



**PAULO JORGE
GUERRA LOPES**

**COLUNAS DE BRITA NO MELHORAMENTO DE
SOLOS MOLES**



**PAULO JORGE
GUERRA LOPES**

**COLUNAS DE BRITA NO MELHORAMENTO DE
SOLOS MOLES**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Cível da Universidade de Aveiro

A quem esteve comigo nesta jornada...

o júri

presidente

Prof. Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Manuel Gonçalves Rodrigues
professor adjunto do Instituto Politécnico da Guarda

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Prof. Doutor Agostinho da Benta, que tornou possível a realização deste projecto pela transmissão da motivação e energia necessárias à conclusão do trabalho.

Agradeço à Ana Cristina Carvalho pelo apoio insubstituível e incansável.

Agradeço ao Professor Doutor Fernando Almeida o interesse e a pronta disponibilidade para ajudar no desenvolvimento dos trabalhos.

Agradeço o apoio do LNEC, em particular na pessoa da Prof. Doutora Laura Caldeira, pelo apoio dado no plano de ensaios laboratoriais.

Agradeço o apoio da empresa G.S.G (Gabinete de Serviços Geotécnicos), através do Eng.º Abílio Nogueira pelo apoio dado na prospecção geotécnica.

Agradeço também o apoio dado pelo CICCOPN na realização de alguns ensaios laboratoriais adicionais.

Finalmente, este trabalho só foi possível executar pelo apoio do grupo Keller, onde me insiro a nível profissional.

No grupo Keller, a nível internacional, agradeço especialmente ao Doutor Jimmy Wehr, que apoiou este trabalho desde o início, com apoio na prospecção geotécnica, com o fornecimento de bibliografia e reflexão sobre alguns resultados.

Agradeço o apoio dos meus colegas da Keller em Portugal, pelo apoio no fornecimento de bibliografia, imagens e alguns dados que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço nomeadamente ao Eng.º José Luiz Antunes, Eng.º Pedro Barros, Eng.º Miguel Candeias, Eng.º Pedro Leandro, Eng.º António Cristóvão, Sr. Telmo Ribeiro e Sr. Manuel Henriques.

palavras-chave

Colunas de Brita, Execução, Controle de qualidade, dimensionamento Priebe, Asaoka, Método Observacional, Plaxis, Mohr-Coulomb, Soft Soil Creep Model

resumo

O presente trabalho, tem como objectivo o estudo e a aplicação da técnica de melhoramento de solos por colunas de brita, focando alguns aspectos práticos do dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito à aplicação do método observacional. Apresentam-se casos concretos de estudo e respectivo dimensionamento, em particular a aplicação de um caso de estudo em que houve tratamento com colunas de brita de solos moles.

Foi apresentado e testado, aparentemente com sucesso, o método observacional desenvolvido por Asaoka, que poderá representar uma importante ferramenta de apoio à decisão e ao projecto no caso de trabalhos em solos de difícil caracterização, especialmente se utilizada em conjunto com o modelo desenvolvido pelo Plaxis para determinar assentamentos de consolidação secundária.

keywords

Stone Columns, Execution, Quality Control, Design, Priebe, Asaoka, Observational Method, Mor-Coulomb, Soft Soil Creep Model.

abstract

The major goal of this work is the study of the soil Improvement technique by stone columns, detailing some practical aspects regarding to design, namely in what concerns to Observational Method.

One real case is presented, with stone columns design on soft soils included.

It was presented and tested, apparently with success, the observational method developed by Asaoka, which can represent an important help decision tool in cases where the soils are difficult to model, specially if used simultaneously with the Soft Soil Creep Model developed by Plaxis to study Fluency settlements.

Índice

1	Introdução.....	11
2	Campos de aplicação da técnica de tratamento de solos através da execução de colunas de brita.....	21
2.1	Parâmetros Melhorados pela técnica de colunas de brita por vibração profunda .	23
2.2	Utilização de colunas de brita em zonas sísmicas	24
2.3	Limites de utilização sob estruturas sensíveis a deformações.....	25
2.4	Cuidados particulares no tratamento de solos muito moles	26
2.5	Tipos de estruturas que podem beneficiar da aplicação da técnica de colunas de brita	26
3	Técnicas de execução disponíveis e aspectos construtivos	31
3.1	Métodos de execução por vibração profunda disponíveis actualmente	31
3.1.1	Processo a seco com alimentação de brita pela superfície – “dry system with top feed method”.....	32
3.1.2	Processo a seco com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador (“dry system with bottom feed method”).....	33
3.1.3	Processo Húmido com abastecimento de agregados pela superfície (“Wet System with top feed method”).....	35
3.1.4	Sistemas s-alpha e offshore	37
3.2	Equipamento.....	39
3.3	Pré furação.....	40
3.4	Plataformas de Trabalho e Camadas de distribuição de cargas	41
3.5	Diâmetro das colunas.....	43
3.5.1	Interface entre solo tratado e a estrutura a construir	43
3.6	Implantação das Colunas de brita	43
3.6.1	Volume de Brita Consumido	44

4	Abordagem ao dimensionamento de obras de melhoramento de solos com colunas de brita	47
4.1	Orientações para a elaboração de um projecto de melhoramento de solos com colunas de brita de acordo com a norma EN14731 de 2005	47
4.1.1	Prospecção geotécnica para projecto de melhoramento de solos	48
4.1.2	Projecto de melhoramento de solos através de colunas de brita	49
4.1.3	Indicações do projecto sobre a execução do tratamento	51
4.2	Dimensionamento	51
4.2.1	Critérios de dimensionamento	51
4.2.2	Parâmetros de dimensionamento	52
4.2.3	Cargas máximas admissíveis	53
4.2.4	Malhas de implantação de colunas de brita	55
4.2.5	Fundações directas em aterros construídos sobre colunas de brita	56
4.2.6	Avaliação das tensões e dos assentamentos	56
4.2.7	Caso particular de obras de aterros	58
4.2.8	Outros métodos de dimensionamento	58
4.2.9	O método de PRIEBE	59
4.2.10	Método observacional de previsão de assentamentos proposto por Asaoka (1978)	68
5	Aspectos construtivos e de controle de qualidade	79
5.1	Controle de Qualidade do processo de Execução	79
5.2	Qualidade dos Agregados a utilizar	82
5.3	Controle de Qualidade Após a Execução	84
6	Aplicação de Modelos de Cálculo de Dimensionamento e Confronto com Resultados Observados em Obra	89
6.1	Enquadramento Geológico	90
6.2	Prospecção Geotécnica	90

6.3	Melhoramento de solos com colunas de brita e pré consolidação	96
6.4	Aplicação do Método Observacional desenvolvido por Asaoka	97
7	Conclusões	117
8	Referências bibliográficas	121

Lista de Figuras

Figura 1: Aspecto de um vibrador “Pilar”, um dos primeiros desenvolvidos pela Keller...	12
Figura 2: Campos de aplicação das técnicas de vibrocompactação e vibro-substituição por colunas de brita em função do tipo de solos (KELLER, 2002).	22
Figura 3: Densificação do solo em torno das colunas de brita executadas por vibração profunda.....	23
Figura 4: Sequência da execução de colunas de brita utilizando o sistema seco com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador (Keller, 2002).	34
Figura 5: Execução de colunas de brita pelo sistema a seco, com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador.	34
Figura 6: Execução de colunas de brita utilizando o sistema húmido com alimentação de agregados pela superfície (Keller, 2002).....	36
Figura 7: Execução de colunas de brita pelo sistema húmido, com alimentação de agregados pela superfície, com suspensão do vibrador e tubos de extensão a partir de uma grua de rastos.	36
Figura 8: Factores que influenciam o grau de densificação do solo.	37
Figura 9: “offshore” de execução de colunas de brita, variante do sistema húmido, (Keller, 2002).....	38
Figura 10: Sistema S-Alpha, que permite a execução de colunas de brita pelo método “bottom feed” com grua de rastos.....	38
Figura 11: Vibrador utilizado no sistema “top feed method”, à esquerda, Vibrador utilizado no sistema “bottom feed method”, à direita.	40
Figura 12: Exemplo de equipamento de pré-furação, com trado de diâmetro mínimo de 600 mm.	41
Figura 13: Exemplo de preparação de uma plataforma de trabalho sobre solos muito compressíveis, em que foi aplicado geotêxtil sob uma camada de material britado. ..	42
Figura 14: Tipos de rotura possíveis de ocorrer em colunas de brita (a) por expansão lateral; (b) por corte no topo da coluna, e (c) por punçoamento.	53

Figura 15: Cota das fundações vs cota do tratamento.	56
Figura 16: Gráfico de dimensionamento para colunas de brita (Pribe, 1995).	62
Figura 17: Acréscimo de A/A_c considerando a compressibilidade da coluna (Pribe, 1995).	63
Figura 18: Ábaco para determinação do factor de profundidade (Pribe, 1995).	65
Figura 19: Valor limite do factor de profundidade (Pribe, 1995).	66
Figura 20: Carga proporcional nas colunas de brita (Pribe, 1995).	67
Figura 21: Curva de assentamento no tempo, adaptado de Magnan e Deroy, 1980.	70
Figura 22: Construção de Asaoka (Magnan e Deroy, 1980).	71
Figura 23: Construção de Asaoka em caso de fluência (Magnan e Deroy, 1980).	72
Figura 24: Construção de Asaoka no caso de carregamento por etapas (Magnan e Deroy, 1980).	73
Figura 25: Construção de Asaoka no caso de carregamento por etapas , com consolidação secundária apenas no final a última fase de carregamento (Magnan e Deroy, 1980). 73	
Figura 26: Construção de Asaoka no caso de carregamento por fases com consolidação em cada fase (Magnan e Deroy, 1980).	74
Figura 27: Sistema Computorizado (M4), utilizado pela Keller, para visualização e registo contínuo dos parâmetros de execução e <i>Layout</i> do registo individual dos parâmetros de execução de cada coluna de brita	81
Figura 28: Ensaio de carga, recorrendo a perfis metálicos e ancoragens verticais ao terreno para garantir a reacção necessária à execução do ensaio.	85
Figura 29: Ensaio de carga, recorrendo a blocos de betão para mobilizar a reacção necessária à execução do ensaio.	85
Figura 30: Execução de ensaio de placa, utilizando a sonda como elemento de mobilização da reacção.	86
Figura 31: Legenda dos cortes geotécnicos apresentados abaixo.	94
Figura 32: Cortes geotécnicos efectuados com base em sondagem com ensaio CPT e em duas sondagens com ensaios SPT executadas na zona em estudo.	95

Figura 33: Implantação do tratamento por colunas de brita	96
Figura 34: Assentamento registado em uma marca ao longo de 280 dias.	97
Figura 35: Aplicação do método gráfico de Asaoka com $\Delta t = 30$ dias	97
Figura 36: Aplicação do método gráfico de Asaoka com $\Delta t = 10$ dias	98
Figura 37: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	99
Figura 38: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	100
Figura 39: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	101
Figura 40: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	102
Figura 41: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	103
Figura 42: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento.....	104
Figura 43: Assentamento por consolidação primária com o método de Priebe (781 mm).	107
Figura 44: Parâmetros geomecânicos utilizados no cálculo de Priebe.	107
Figura 45: Parâmetros utilizados no modelo Mohr Coulomb.	108
Figura 46: Resultado dos cálculo dos assentamentos com o modelo Mohr-Coulomb.	109
Figura 47: Determinação dos valores de K^* ; λ^*	110
Figura 48: Determinação do valor de μ^* para o patamar de carga de 105 kPa.	110
Figura 49: parâmetros utilizados no modelo Soft Soil Creep.....	111
Figura 50: Assentamentos estimados com o modelo Soft Soil Creep Model (1600 mm).	111
Figura 51: Assentamento observados e calculados com modelos Mohr Coulomb e Soft Soil Creep.....	112

Lista de Quadros

Quadro 1: Resumo cronológico do desenvolvimento do melhoramento de solos por técnicas de vibração profunda desenvolvidas pela Keller.....	12
Quadro 2: Técnicas de Melhoramento de Solos (adaptado de K. Kirsch e W. Sondermann, 2003).....	16

Quadro 3: Valores utilizados na construção de Asaoka	71
Quadro 4: limites de Atterberg, densidade e baridades obtidas nas amostras S3, S6, 4833, 4834 e 4837 e SB2010.....	91
Quadro 5: Resumo dos resultados do ensaio edométrico da amostra S6.....	92
Quadro 6: Resumo dos resultados do ensaio edométrico da amostra S6.....	92
Quadro 7: Resultados dos ensaios de dissipação com CPTu	93
Quadro 8: Análise do “peso” relativo da fluência no assentamento total.....	105

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 Introdução

Desde os anos 50, as colunas de brita têm sido aplicadas como técnica de melhoramento de solos coesivos e areias siltosas. Os campos de aplicação desta técnica incluem: a estabilização de solos de fundação para suporte de aterros (com o objectivo de reduzir o tempo de consolidação primária); fundação de estruturas de contenção, como por exemplo muros de terra armada; fundação de pavilhões industriais, de depósitos de combustíveis ou outras estruturas com cargas distribuídas; estabilização de zonas com riscos elevados de ocorrência de deslizamentos de terras e redução do potencial de liquefacção em areias limpas e soltas. Esta técnica é ainda aplicada no melhoramento dos solos de fundação de edifícios de habitação.

O desenvolvimento do melhoramento de solos aplicando a técnica das colunas de brita deu-se a par do desenvolvimento das técnicas de vibrocompactação profunda de solos arenosos, ambas com o objectivo de aumentar a capacidade de carga destes solos. No entanto a vibrocompactação profunda tem o seu campo de aplicação limitado a solos arenosos sem finos, em solos com maior quantidade de finos ($> 5\%$), ou o tempo necessário à compactação dos solos é demasiado para que o tratamento seja economicamente viável, ou simplesmente não é possível efectuar o melhoramento dos solos, daí que para estes casos e para solos coesivos compressíveis se tenha desenvolvido, a partir da técnica de vibrocompactação profunda, a técnica de execução de colunas de brita por vibração profunda, que implica a adição de agregados (normalmente material britado) com grande resistência à compressão, introduzidos no solo em profundidade e compactados por vibração sob a forma de colunas (colunas de brita que podem ter diâmetros variáveis entre 0,6 e 1,2 m) de tal forma que permitem obter maciços de solos melhorados com capacidades de carga de até 30 toneladas ou mesmo superiores.

Quando comparados com outros métodos de fundações, estes processos são de execução simples sendo a sua aplicação extraordinariamente eficaz e, em geral, produzem uma significativa redução dos custos de execução das fundações. Este trabalho descreve vários

aspectos desde a concepção passando pela execução e terminando no controle de qualidade, necessários à correcta aplicação desta técnica. Será também apresentado um exemplo da sua aplicação em obra.

O desenvolvimento da técnica das colunas de brita está intimamente ligada à empresa Keller, esta companhia foi pioneira na implementação de várias técnicas actualmente usadas no tratamento de solos por vibrosubstituição. Sendo possível seguir pelo

Quadro 1 o resumo do desenvolvimento das técnicas de vibração profunda dos solos ao longo da história da Keller. A Figura 1 mostra um dos primeiros vibradores desenvolvidos pela Keller.

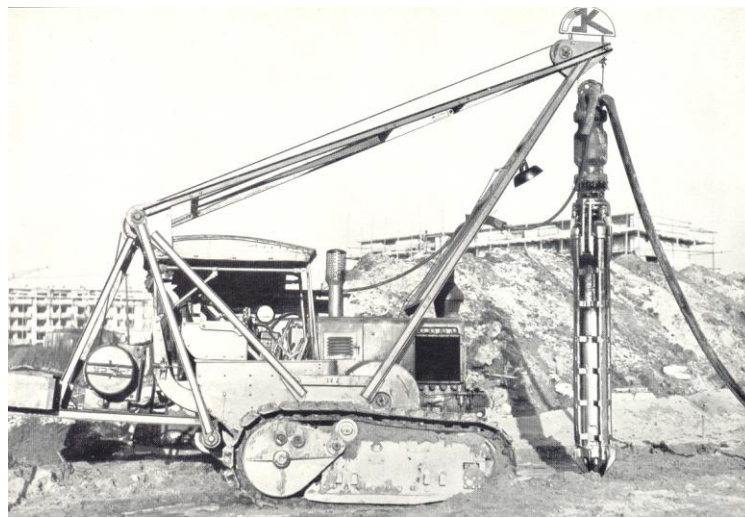


Figura 1: Aspecto de um vibrador “Pilar”, um dos primeiros desenvolvidos pela Keller.

Quadro 1: Resumo cronológico do desenvolvimento do melhoramento de solos por técnicas de vibração profunda desenvolvidas pela Keller.

Ano	Técnica de vibração
1933	Patente para <i>soil compaction</i> por vibradores em profundidade;
1936	Primeira aplicação prática dos vibradores de profundidade Keller ;
1939	Recorde mundial em profundidade de tratamento por vibrocompactação: 35 m , em Berlim;
1957	Testes de vibrocompactação para a Barragem de Assuão no Egipto;
1961	Primeira obra com sistema de vibrosubstituição, após desenvolvimento do vibrador torpedo ;
1972	Registo da patente do <i>bottom feed vibrator</i> ;
1975	Modernização das oficinas e desenvolvimento de uma nova geração de vibradores “deep vibrators” e de máquinas “vibro cats” ;
1976	Primeiras colunas de brita injectadas e colunas de betão vibradas ;
1980	Introdução do S – Vibrator ;
1993	Novo recorde de profundidade em Vibrocompactação: 45 m ;
1995	Introdução do Vibrador – L ;
1997	Desenvolvimento de uma nova máquina “vibro cat” ;

Segundo os Eurocódigos 7 e 8, quando as condições limite de rotura dos solos face aos carregamentos a aplicar são atingidas, deverão ser consideradas as seguintes soluções:

- a) Transferência das cargas para uma camada profunda mais competente;
- b) Remoção do solo com condições de fundação deficientes e sua substituição por solos de melhor qualidade;
- c) Transformação dos solos deficientes em solos adequados às condições de carregamentos a aplicar através da utilização de “Técnicas de Melhoramento dos Solos”.

Com o melhoramento do solo pretende-se normalmente alterar algumas das suas propriedades, nomeadamente:

- Aumento da densidade e da resistência ao corte resultando na melhoria da estabilidade;
- Redução da compressibilidade, resultando na diminuição da deformação;
- Alteração da permeabilidade do solo, resultando na melhoria das condições de drenagem, aumento da velocidade de deformação ou redução da afluência de água;
- Melhoramento da homogeneidade do solo.

O melhoramento de solos com colunas de brita, tema deste trabalho, prende-se com o que diz respeito à alínea c), ou seja com a transformação de solos “deficientes” em solos adequados às condições de carregamentos impostos.

Como abordagem inicial, e tendo por objectivo o enquadramento geral do tópico sobre o qual se pretende desenvolver alguns aspectos, no Quadro 2 apresenta-se a classificação de técnicas de melhoramento de solos segundo K.Kirsch e W. Sonderman (2003), onde se propõe uma divisão destas técnicas em dois grandes grupos, nomeadamente técnicas de Compactação de solos e técnicas de Reforço de solos.

O primeiro grupo engloba um conjunto de técnicas em que o solo existente *in situ* é melhorado em alguma ou algumas das suas características sem adição de qualquer material adicional, neste grupo incluem-se a pré-carga, a vibrocompactação profunda, a compactação dinâmica, entre outras.

O segundo grupo engloba técnicas em que o melhoramento passa pela adição de materiais ou conjuntos de materiais como cimento, cal, bentonite, brita, areia, entre outros, que

contribuirão para o melhoramento pretendido. Este grupo de técnicas engloba por exemplo o *Jet Grouting*, o *Deep Soil Mixing*, as Colunas de Brita entre outros.

Para todas estas técnicas existem campos de aplicação particulares, e em alguns casos eles sobrepõem-se devendo ser analisada a solução que melhor se ajusta às condições existentes no local da obra, no que diz respeito aos solos existentes à envolvente da zona da obra, aos objectivos do tratamento, considerando ainda aspectos ambientais e claro a componente económica da solução terá obviamente um peso importante na decisão.

A técnica de colunas de brita, no que diz respeito a soluções de melhoramento de solos de fundação apresenta normalmente grandes vantagens ambientais, técnicas e económicas em relação a outros métodos quando aplicáveis ao mesmo caso.

As vantagens ambientais prendem-se com o facto de aplicação de agregados britados não é tão agressiva para o ambiente como a aplicação de materiais como cimento, aditivos, ferro, etc.

Em termos técnicos uma grande vantagem que esta solução apresenta no campo das fundações de edifícios é o facto de as fundações poderem ser dimensionadas como fundações directas, mas considerando um solo com maior capacidade de carga. Por outro lado, no caso de aterros, além de diminuir significativamente o assentamento total são obtidas velocidades de consolidação muito elevadas, que permitem diminuir o tempo de execução da obra.

As vantagens económicas da aplicação da técnica de Colunas de Brita também podem ser significativas uma vez que a produção (velocidade de execução) é normalmente muito elevada reduzindo o prazo de execução e, por outro lado, os agregados britados são significativamente mais baratos que o cimento, o ferro, etc.

Portanto em muitos casos esta técnica, quando bem dimensionada e bem executada, apresenta um grande potencial de aplicação com grandes vantagens técnicas e económicas face a outras técnicas de melhoramento de solos e inclusive face a soluções de fundações indirectas por estacas.

Como se pode verificar pela análise do Quadro 2, a técnica de Colunas de brita, melhoramento de solos coesivos por reforço com material pouco deformável (reforço do solo com adição de um elemento com elevada resistência – brita), insere-se numa técnica de reforço de solos com efeito de deslocamento do solo durante a execução. Isto é, durante

a penetração do vibrador no solo e durante a introdução e aperto da brita o solo envolvente é comprimido e deslocado horizontalmente.

Quadro 2: Técnicas de Melhoramento de Solos (adaptado de K. Kirsch e W. Sondermann, 2003).

TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS					
Substituição de solos	Compactação		Reforço		
	Métodos Estáticos	Métodos dinâmicos	Com efeito de deslocamento do solo durante a execução	Sem efeito de deslocamento do solo durante a execução	
				Introdução Mecânica	Introdução hidráulica
	<ul style="list-style-type: none"> - Pré-carga - Pré - carga com ajuda da aceleração da consolidação (ex. drenos verticais) - Compaction Grouting - Influenciando as águas subterrâneas 	<u>Compactação por vibração:</u> <ul style="list-style-type: none"> -Vibrador de profundidade (Vibro-compactação) - Martelo vibratório <u>Compactação por impacto:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Compactação dinâmica - Densificação com Explosivos -Compactação através do método “Air Pulse” 	Colunas de brita por Vibração Profunda <ul style="list-style-type: none"> - Colunas de betão vibrocompactado - Colunas de areia compactadas - Colunas de cal/cimento - Compaction Grouting 	<ul style="list-style-type: none"> - Método MIP (mixed in place method) (ex. Deep Soil Mixing) - Método FMI (cut, mix, inject) - Injecções de permeação - Congelamento 	Jet Grouting

As colunas de brita, como já atrás referido, são constituídas por materiais granulares, sem coesão, instaladas no local por deslocamento do solo e com compactação por passos sucessivos. Podem ser executadas em malhas regulares ou variáveis, em linhas, em grupos ou isoladamente. O seu dimensionamento tem em conta o tipo de obra a realizar, a natureza das cargas, as tolerâncias ou valores pré-definidos para assentamentos absolutos e diferenciais, assim como do tipo de solo a tratar.

O tratamento de solos por colunas de brita tem por objectivo conferir ao solo tratado novas características geomecânicas, gerais ou locais de forma a que os diferentes elementos a construir, quer sejam sapatas isoladas, ou contínuas, lajes de ensoleiramento geral, pavimentos flexíveis ou aterros, apresentem um comportamento previsível, justificável e compatível com as regras e tolerâncias aplicáveis à estrutura e sua utilização.

O tratamento de solos por colunas de brita conjuga as seguintes acções, onde uma ou várias podem ser pretendidas:

- aumento da capacidade de carga do solo;
- redução de assentamentos;
- homogeneização das características geotécnicas;
- aumento da velocidade de consolidação (as colunas de brita funcionam como elementos drenantes;
- aumento dos parâmetros geomecânicos equivalentes do solo tratado (tensão de corte horizontal, ângulo de atrito interno e módulo de deformação).

Relembra-se que uma coluna de brita representa um procedimento de melhoramento de solos, não sendo um elemento de fundação nem uma fundação profunda. As fundações de uma obra a construir sobre um solo tratado com colunas de brita são sempre fundações directas executadas por sapatas corridas, isoladas ou laje de ensoleiramento geral. O solo tratado com colunas de brita pode ainda servir de fundação de aterros sobre solos moles. Os cálculos a efectuar para as fundações são os normalmente utilizados para a execução de fundações directas. A exequibilidade do tratamento de solos deve ser baseada numa análise geotécnica dos solos e cargas envolvidos, podendo, em fase de estudo prévio, efectuar-se um pré dimensionamento do tratamento.

Neste momento já existem diversas variantes da técnica de vibração profunda por colunas de brita, como sejam elementos de fundações do tipo de estacas vibrobetonadas ou as colunas de brita injectadas, que aumentam o campo de aplicações destas técnicas. No entanto, estas evoluções não vão ser aqui discutidas dado sair fora do âmbito deste trabalho.

O presente trabalho pretende resumir os aspectos essenciais do resultado da evolução quer dos equipamentos e métodos de execução disponíveis, quer dos métodos de dimensionamento e controle de qualidade, que permitem a aplicação destas técnicas com confiança e fiabilidade. A importância que esta técnica de melhoramento de solos tem vindo a ganhar nas últimas décadas, tem a ver essencialmente com o crescente valor do solo e dos projectos imobiliários, o que tem vindo a tornar economicamente viável a construção em zonas de solos moles, principalmente em zonas costeiras e/ou de planícies aluviais. Além disso é uma técnica que apresenta algumas vantagens em termos ambientais uma vez que o consumo de cimento e aço é nulo. Muitas vezes apresenta também vantagens económicas significativas face a outro tipo de soluções, quer de melhoramento de solos quer de fundações indirectas.

CAPÍTULO 2

CAMPOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TRATAMENTO DE SOLOS ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DE COLUNAS DE BRITA

2 Campos de aplicação da técnica de tratamento de solos através da execução de colunas de brita

Os vibradores de profundidade permitem o tratamento do solo melhorando as suas características mecânicas, aumentando a sua capacidade de carga e reduzindo a susceptibilidade aos assentamentos.

A execução de colunas de brita por vibração profunda, inicia-se com introdução de um vibrador no solo, com ajuda de um fluído de injeção, normalmente água ou ar. Atingida a profundidade definida, é introduzido o material de enchimento da coluna (brita), a compactação da brita é efectuada pelas vibrações radiais que o vibrador transmite ao solo e pelos movimentos ascendentes e descendentes. Obtêm-se assim um cilindro de material britado, com características geomecânicas muito diferentes do solo natural. Saliente-se que, além de brita, podem ser utilizados outros materiais britados provenientes da demolição de edifícios, desde que previamente preparados para o efeito.

Neste método o melhoramento induzido ao solo não é homogéneo, consiste na construção de elementos lineares mais rígidos que o solo natural envolvente. Este após o tratamento apresentar-se-á mais compactado, principalmente se se tratar de solo arenoso com poucos finos mas, ainda assim, mais deformável que as colunas de brita aí instaladas. Normalmente para solos com menos de 15 % de finos (passados no peneiro 200 da série ASTM) e menos de 2 % de argila a densificação através das vibrações induzidas pelo processo é efectiva. No caso de solos com percentagens de siltes e argila superiores ao atrás referido, o melhoramento dos solos será essencialmente devido à substituição e deslocamento induzidos pela execução das colunas de brita, isto porque estes solos apresentam normalmente valores baixos de permeabilidade, sendo que as acções dinâmicas de curta duração provocadas pelo vibrador não são suficientes para os compactar.

Nos solos finos argilosos, em que predominam processos de adensamento por consolidação através da expulsão de água intersticial, a simples vibração não produz qualquer

densificação do solo. Nestas situações a inclusão de colunas de brita para além aumentar a capacidade de carga dos solos, reduzindo as deformações, acelera a consolidação, uma vez que as colunas de brita funcionam também como elementos drenantes de elevada permeabilidade. A Figura 2 apresenta o espectro de aplicação da vibrocompactação e das colunas de brita em função do tipo de solos.

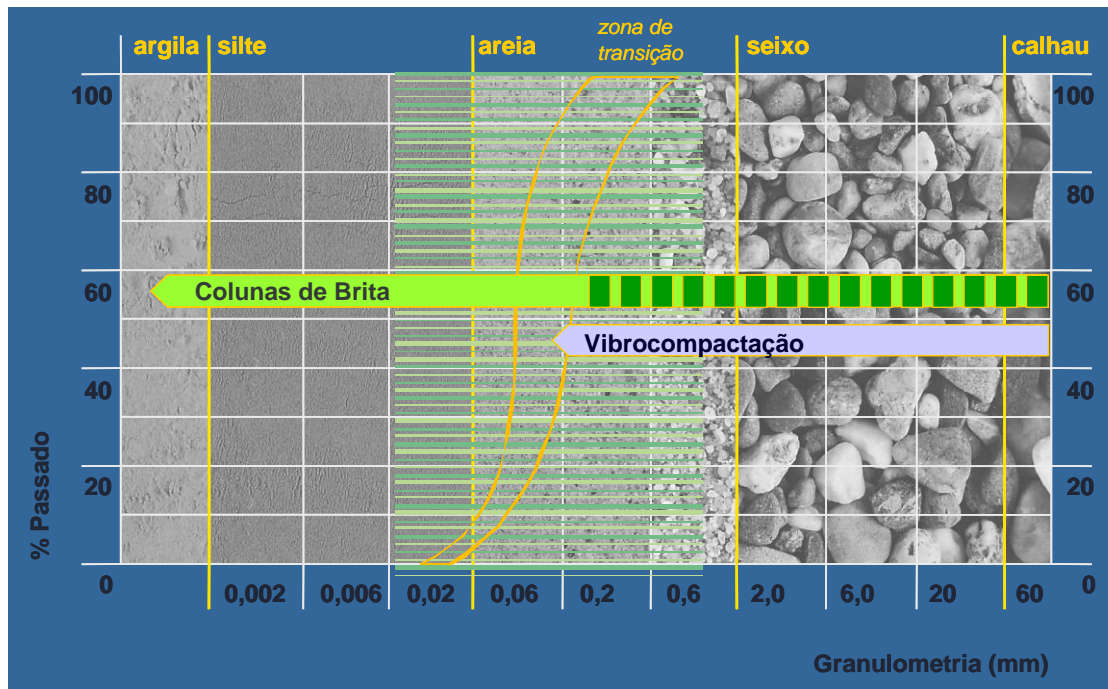


Figura 2: Campos de aplicação das técnicas de vibrocompactação e vibro-substituição por colunas de brita em função do tipo de solos (KELLER, 2002).

As colunas de brita, como aliás já referido no capítulo 1, produzem um melhoramento de solo através da introdução no solo de um reforço nomeadamente através da introdução de material britado compactado, aumentando a sua capacidade de carga e diminuindo a deformabilidade do conjunto (solo + colunas), provocando uma alteração estrutural do solo natural.

Apresentam-se seguidamente os objectivos normalmente pretendidos com este tipo de tratamento de solos, quer para solos coerentes quer incoerentes.

a) em solos coerentes:

- a realização de fundações directas;
- a diminuição dos assentamentos;

- o aumento da estabilidade;
- a redução do tempo de consolidação em solos compressíveis;

b) em solos incoerentes:

- a diminuição dos assentamentos;
- a redução do potencial de liquefacção.

A técnica de colunas de brita por vibração profunda, por ser a técnica central deste trabalho, irá ser explorada com maior detalhe nos parágrafos seguintes.

2.1 Parâmetros Melhorados pela técnica de colunas de brita por vibração profunda

Tal como referido anteriormente, esta técnica consiste na introdução de um material no solo (Figura 3), material este com parâmetros mecânicos conhecidos, e normalmente mais elevados que os respectivos parâmetros do solo a tratar, de forma obter um solo compósito com melhores características geomecânicas. Em termos gerais, este melhoramento altera as características dos solos do seguinte modo:

- Aumenta a rigidez do solo tratado;
- Aumenta a resistência ao corte;
- Promove a compactação de solos incoerentes, soltos, com redução do potencial de liquefacção sísmica (caso exista);
- Aumenta a capacidade de carga dos solos;
- Aumenta da taxa de consolidação (diminui os tempos de consolidação).

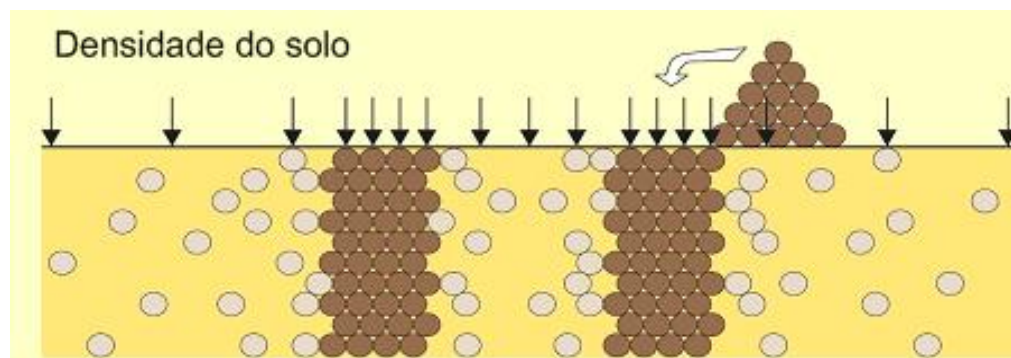


Figura 3: Densificação do solo em torno das colunas de brita executadas por vibração profunda

O melhoramento das características geomecânicas acima referidas está geralmente associado ao tratamento de certos tipos de solos problemáticos (Raju *et al*, 2004), tais como: i) Areias siltosas soltas susceptíveis de sofrer liquefacção por excitação sísmica, onde ocorrem normalmente assentamentos excessivos; ii) solos constituídos por depósitos artificiais de materiais finos resultantes da actividade mineira, caracterizados por uma resistência ao corte muito baixa (normalmente entre 5 e 10 kPa), baixa plasticidade e permeabilidade relativamente alta. Têm geralmente associados problemas relacionados com a capacidade de carga e estabilidade; iii) Solos constituídos por depósitos naturais finos (argilas marinhas moles), normalmente existentes nas zonas costeiras, caracterizam-se por uma baixa resistência ao corte (normalmente entre 6 e 12 kPa) são frequentemente compostos por argilas sensíveis, com baixa permeabilidade e alta plasticidade. Os problemas que se põem neste tipo de solos prendem-se com a capacidade de carga, a estabilidade e a consolidação a longo prazo.

2.2 Utilização de colunas de brita em zonas sísmicas

Tal como referido, a execução de colunas de brita contribui para a diminuição do potencial de liquefacção dos solos associado aos fenómenos sísmicos.

A liquefacção poderá ocorrer em solos saturados soltos ou medianamente soltos com granulometria relativamente uniforme. Os solos mais susceptíveis de sofrerem o fenómeno são constituídos por areias finas com alguma percentagem de silte. Quando os solos são solicitados por uma acção sísmica, as forças resultantes conduzem a um ajustamento da estrutura do solo densificando-o. Se durante um sismo o solo não conseguir drenar quase instantaneamente os excessos de pressão intersticial gerados, então a tensão efectiva pode diminuir bastante ou mesmo anular-se ($\text{Tensão Efectiva} = \text{Tensão Total} - \text{Pressão Intersticial}$). Quando esta situação ocorre a resistência ao corte do solo é muito reduzida, comportando-se o solo como um fluido, o que poderá provocar danos graves às estruturas neles construídas.

As colunas de brita apresentam uma grande flexibilidade na resposta a solicitações sísmicas, o que lhes permite absorver significativas deformações sem perderem a capacidade de carga. Por outro lado, a execução das colunas de brita aumenta a capacidade de drenagem do solo, pois funcionam como drenos verticais de grande diâmetro, permitindo a eliminação das pressões intersticiais geradas pelas acções sísmicas. Para além

disso as colunas de brita contribuem para a densificação do solo entre as mesmas, reduzindo assim a susceptibilidade do solo sofrer do efeito de liquefacção sísmica.

2.3 Limites de utilização sob estruturas sensíveis a deformações

As colunas de brita não devem ser aplicadas em terrenos susceptíveis de perder características volumétricas e/ou mecânicas ao longo do tempo, nomeadamente em aterros de lixos domésticos, turfas e, de uma forma geral, solos que apresentem uma perda ao rubro superior a 5 % de acordo com a norma XP 94-047.

Os solos muito compressíveis (vasas e argilas moles) com espessuras superiores a 0,5 m que apresentam características geomecânicas fracas ($c_u < 20$ kPa ou $q_c < 300$ kPa) (NFP11-212), necessitarão de um estudo particular e de disposições construtivas específicas, como por exemplo pré-carga e consolidação.

Quanto menor a resistência ao corte do solo natural menor o confinamento que o solo proporciona à coluna de brita, reduzindo a capacidade de carga axial da mesma, resultando numa maior deformação, e consequente redução da capacidade de carga do conjunto coluna/solo. Em solos argilosos, com valores de c_u inferiores a 10 kPa, dado o confinamento lateral proporcionado pelo solo ser muito reduzido, o dimensionamento e a aplicação desta solução deve revestir-se de especial cuidado, deverão ser consideradas altas taxas de substituição, maiores diâmetros de coluna e malhas de implantação de colunas mais apertadas.

Por outro lado, em solos que apresentem valores de c_u a partir de 50 kPa a 100 kPa, esta técnica poderá ser de difícil execução, devido à elevada resistência que os solos oferecem à penetração do vibrador. Caso se trate apenas de ultrapassar uma camada superficial mais resistente ou uma camada entre solos moles, esse problema poderá ser ultrapassado recorrendo a pré-furação com trado de grande diâmetro (500 a 600 mm). Solução que poderá ser viável economicamente, caso as profundidades de perfuração não sejam excessivas (normalmente até 4 a 6m de profundidade).

2.4 Cuidados particulares no tratamento de solos muito moles

De forma a garantir um tratamento eficaz de solos muito moles, é recomendável dar particular atenção aos seguintes aspectos da execução deste tratamento neste tipo de solos:

- a equipa executante deve ter experiência comprovada;
- deve ter-se disponível prospecção geotécnica precisa e projecto de execução detalhado, monitorização computadorizada em tempo real, e finalmente plano de monitorização após a conclusão da obra;
- a profundidade de tratamento não deve ser limitada, isto é, as colunas devem ser instaladas até à nega do vibrador;
- normalmente, neste tipo de solos, não é recomendado um diâmetro de coluna de brita inferior a 1,0 m;
- o espaçamento entre colunas não deve ser superior a 2,5 m (entre centros de colunas);
- a relação das áreas da célula unitária e da coluna (A/A_c) deve variar entre 12% na extremidade inferior e 30% na extremidade superior (FHWA, 1983);
- a transferência de cargas para as colunas de brita deverá ser analisada com o devido cuidado, de forma a assegurar que essa transferência se dá da forma correcta.

2.5 Tipos de estruturas que podem beneficiar da aplicação da técnica de colunas de brita

A técnica de vibrosubstituição é uma técnica amiga do ambiente, uma vez que não existe introdução de aço ou betão no solo, apenas brita. No sistema a seco não são produzidos resíduos, embora no sistema húmido sejam produzidas lamas constituídas pelo solo existente e pela água utilizada no processo de execução.

As utilizações mais frequentes do tratamento de solos por colunas de brita dizem respeito a obras onde se prevêem fundações que proporcionam uma distribuição de cargas homogénea e susceptíveis de aceitar assentamentos, nomeadamente: i) zonas de armazenamento; ii) edifícios industriais e comerciais; iii) silos e reservatórios; iv) obras hidráulicas estanques (reservatórios, estações de tratamento de águas residuais).

Podem ainda ser utilizadas em outros tipos de obras onde as deformações residuais do solo tratado e do solo subjacente sejam compatíveis com a estrutura a construir e com as prescrições técnicas associadas nomeadamente em infra-estruturas de transporte (estradas, vias férreas, aeroportos, obras de arte, muros de contenção), em obras marítimas (reforço de fundos marinhos, lacustres ou fluviais) e sob fundações superficiais de edifícios.

O campo de aplicação da vibrosubstituição por colunas de brita tem vindo a aumentar e há uma crescente aceitação desta técnica por parte de projectistas e donos de obra, no tratamento de uma variedade cada vez maior de solos e para diferentes tipos de estruturas. Os objectivos do tratamento são essencialmente limitar assentamentos e assegurar a estabilidade. Os solos onde tem vindo a ser aplicada esta técnica são constituídos predominantemente por areias siltosas soltas, siltes extraordinariamente moles, argilas marinhas muito moles e até aterros sanitários. Em regiões com risco sísmico elevado, também tem sido aplicada como forma de diminuir o potencial liquefacção sísmica dos solos arenosos.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE EXECUÇÃO DISPONÍVEIS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

3 Técnicas de execução disponíveis e aspectos construtivos

A vibrosubstituição por colunas de brita é uma técnica que derivou de desenvolvimentos da técnica de vibrocompactação de solos granulares, permitindo a sua aplicação em solos coesivos.

Tal como referido no Capítulo 2, os solos constituídos por argilas, siltes ou depósitos constituídos por misturas de siltes e areias e/ou argilas moles podem ser melhorados com a aplicação da técnica de vibrosubstituição por colunas de brita. Devido ao seu carácter coesivo, as partículas finas dos solos não se separam quando expostas a vibrações, apenas “deslizam” umas contra as outras não podendo ser deslocadas ou comprimidas pela acção das vibrações, daí que no processo de vibrosubstituição é adicionado material granular, consistindo normalmente em brita ou seixo britado.

Neste capítulo vamos apenas abordar os processos de execução de colunas de brita por vibração profunda, apesar de terem sido utilizados no passado outros métodos não vibratórios, pois actualmente os métodos vibratórios são os que produzem os melhores resultados, quer tecnicamente, quer economicamente (porque permitem produções diárias muito superiores a qualquer dos restantes métodos).

3.1 Métodos de execução por vibração profunda disponíveis actualmente

Os métodos de execução por vibração profunda podem ser classificados quanto ao fluido injector e/ou quanto ao tipo de abastecimento de brita.

As colunas de brita podem ser executadas por dois sistemas distintos de vibração profunda:

- i) o sistema húmido (“wet system”) - em que a perfuração é efectuada com injeção de água;
- ii) o sistema seco (“dry system”) - em que a perfuração é apoiada pela injeção de ar comprimido.

Ainda se podem distinguir os diferentes processos de execução pelo tipo de abastecimento de brita:

- iii) “top feed method”, em que a brita é abastecida a partir do topo da plataforma de trabalho, sendo despejada à boca do furo e percorrendo o espaço anelar entre as paredes do furo e os tubos de extensão, e
- iv) “bottom feed method”, em que a brita é introduzida numa tremonha ligada a um tubo acoplado ao vibrador e tubos de extensão de forma a levar a brita directamente até à extremidade inferior do vibrador.

Estes diferentes detalhes de execução podem ser combinados entre si, resultando em diferentes métodos de execução. Existem 3 métodos principais de execução de colunas de brita vibradas, dos quais os mais usualmente utilizados na actualidade são os dois últimos:

- a) processo a seco (“dry system”) com alimentação de agregados pela superfície (“top feed method”);
- b) processo a seco (“dry system”) com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador (“bottom feed method”);
- c) processo húmido (“wet system”) com alimentação de brita pela superfície (“top feed method”).

Em cada um destes processos são utilizados vibradores com algumas diferenças entre eles mas cujo princípio de funcionamento é o mesmo, ou seja, consistem num conjunto de massas excêntricas que rodam rapidamente protegidos por um tubo de revestimento em aço. A rotação das massas excêntricas provoca as vibrações que baptizam esta técnica. A extremidade inferior do vibrador é afunilada para melhor penetrar o solo enquanto que as “asas” laterais evitam que o vibrador rode sobre si próprio durante a penetração no solo.

Apresenta-se de seguida uma pequena descrição de cada um dos processos referidos, sendo estas descrições indicativas, pois na prática podem existir pequenas alterações de pormenor.

3.1.1 Processo a seco com alimentação de brita pela superfície – “dry system with top feed method”

Em solos granulares este método só é passível de execução acima do nível freático.

O conjunto composto pelo vibrador e tubos de extensão é suspenso com uma grua de rastos e o vibrador é baixado penetrando em solos moles com a ajuda do seu próprio peso, da vibração de alta frequência e com o apoio da injeção de ar comprimido. O ar comprimido é fornecido por um compressor, que o leva até aos injectores posicionados normalmente acima da extremidade inferior do vibrador.

Após atingir a profundidade requerida, o vibrador é içado ligeiramente sendo adicionada uma pequena quantidade de brita pelo espaço anelar entre as paredes do furo e o vibrador e tubos de extensão, sendo então baixado o vibrador novamente de forma a compactar os agregados e “apertá-los” contra o solo confinante. Este processo vai sendo repetido sucessivamente construindo uma coluna de brita até ao topo da plataforma de trabalho. A brita adicionada faseadamente é compactada até níveis de consumo de energia pré definidos; no caso dos vibradores eléctricos, é definido o consumo de energia eléctrica através da verificação dos Amperes consumidos.

3.1.2 Processo a seco com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador (“dry system with bottom feed method”)

Neste caso, uma vez que o vibrador permanece no furo durante a construção da coluna, o processo pode ser executado com sucesso em solos instáveis e pode ser aplicado em substituição do processo a húmido na maioria dos casos. O vibrador utilizado nesta técnica tem acoplado um tubo instalado até à extremidade inferior do vibrador, permitindo o abastecimento de agregados directamente no fundo do furo e na zona central do vibrador.

O processo é executado da seguinte forma, posiciona-se o vibrador na vertical sobre o ponto a tratar, neste método a coluna é composta pelo vibrador, pelo tubos de extensão e por uma tremonha de abastecimento de brita (Figura 5). A brita com que se abastece o tubo antes de iniciar a execução do furo funciona como uma rolha na ponta do vibrador, evitando que o tubo de abastecimento de brita fique preenchido por solo durante a realização do furo.

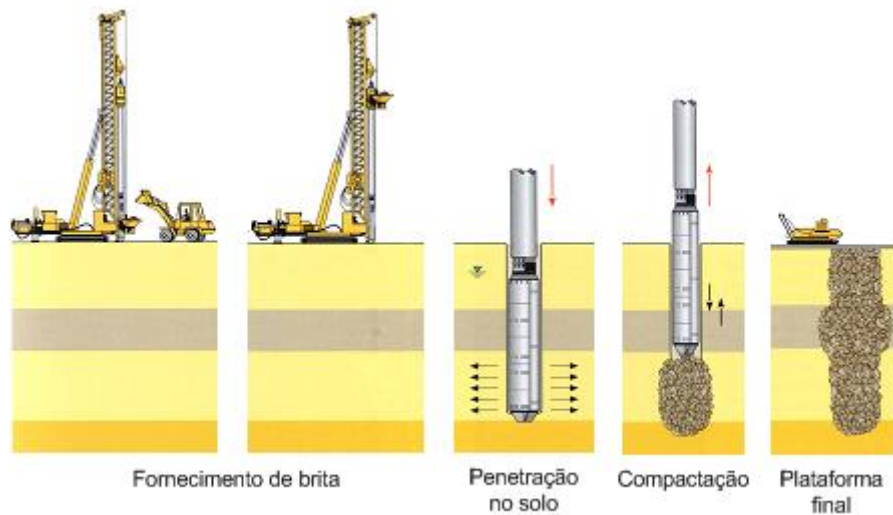


Figura 4: Sequência da execução de colunas de brita utilizando o sistema seco com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador (Keller, 2002).



Figura 5: Execução de colunas de brita pelo sistema a seco, com alimentação de agregados pela extremidade inferior do vibrador.

A perfuração, também neste procedimento, é executada com o peso próprio do vibrador, com apoio da injeção de ar comprimido e das vibrações aplicadas ao solo e caso necessário da activação da máquina. A coluna de brita é formada e compactada içando ligeiramente o vibrador por um período de tempo curto para permitir a saída da brita pela extremidade inferior sendo posteriormente forçado para baixo de forma a compactar a brita

e “apertá-la” contra o solo confinante. Este processo é repetido as vezes necessárias para completar a coluna de brita até à plataforma de trabalho (esquema conceptual na Figura 4).

As limitações do processo prendem-se com a profundidade de execução, que é limitada pela altura da torre da sonda (Figura 5) que varia, conforme os modelos, entre 6 e 25 m.

3.1.3 Processo Húmido com abastecimento de agregados pela superfície (“Wet System with top feed method”)

O processo húmido é utilizado quando o processo a seco com alimentação de brita pela superfície não pode ser aplicado devido à instabilidade do solo, provocada por exemplo pela existência de nível freático alto em solos arenosos. O vibrador utilizado é idêntico ao do processo referido em § 3.1.1, com a diferença de estar preparado para a injeção de água.

O vibrador é suspenso normalmente a partir de uma grua de rastos, é baixado na vertical até ao nível do solo, nesta altura inicia-se a injeção de água (os injectores de água ficam normalmente posicionados na extremidade inferior do vibrador) e o vibrador vai penetrando nos solos moles com a ajuda do seu próprio peso, dos jactos de água e das vibrações. Durante a perfuração, a espaços, o vibrador é parcialmente içado de forma a garantir a limpeza do furo através da remoção do solo acumulado nas paredes do mesmo.

Após a abertura do furo até à profundidade requerida, o vibrador é mantido em profundidade sendo reduzido o caudal de injeção de água e adicionados os agregados através do espaço anelar (espaço entre as paredes do furo e o vibrador), permitindo assim a construção da coluna de brita por troços sucessivos. É importante manter a injeção de água até que o vibrador atinja a superfície, para garantir a estabilidade das paredes do furo. O vibrador compacta os agregados adicionados e “aperta-os” contra o solo confinante. O processo é repetido até se obter uma coluna de brita compactada até à cota da plataforma de trabalho (ver Figura 6 e Figura 7).

A vantagem deste método em relação ao anterior prende-se com o facto de as limitações de profundidade dependerem apenas da capacidade da grua em suportar o peso do vibrador e os respectivos tubos de extensão. Com este método têm sido executadas colunas de brita com profundidades superiores a 40 m.

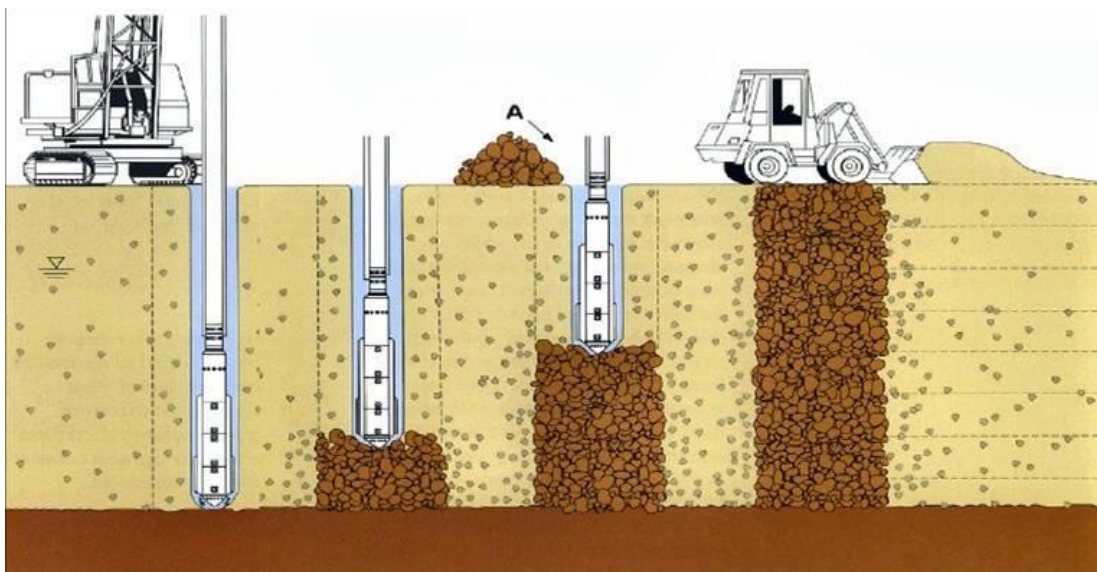


Figura 6: Execução de colunas de brita utilizando o sistema húmido com alimentação de agregados pela superfície (Keller, 2002).



Figura 7: Execução de colunas de brita pelo sistema húmido, com alimentação de agregados pela superfície, com suspensão do vibrador e tubos de extensão a partir de uma grua de rastros¹.

As desvantagens que apresenta em relação ao método seco prendem-se com o grande consumo de água e a necessidade de tratar grandes quantidades de lamas produzidas durante este processo. O método húmido consome quantidades de água entre 5 e 15 l.s⁻¹, normalmente só é viável quando existe água disponível junto ao local da obra. Associado ao grande consumo de água está a produção de grandes quantidades de lamas, provenientes

¹ O equipamento para execução de colunas de brita pelo sistema a seco, com alimentação de agregados pela superfície, é idêntico, apenas variando o fluído de injeção e os respectivos equipamentos de injeção compressor no caso do sistema seco, ou bomba de água no caso do sistema húmido.

da perfuração, estas lamas têm de ser retidas para bacias/lagoas de decantação a construir *in situ*, e posteriormente removidas a vazadouro.

A escolha da técnica e equipamento a utilizar dependerá do tipo e estado de saturação do solo a tratar, do objectivo pretendido e das características dos materiais a utilizar. O grau de densificação do solo é função do tipo de solo, da sua percentagem de finos (siltes e argilas) e respectiva plasticidade, da densidade relativa inicial, do tipo de vibrador e tempo de actuação, depende ainda da forma, granulometria e durabilidade (resistência ao desgaste) dos agregados a aplicar, da secção da coluna e da malha de colunas aplicada. Normalmente, quanto maior quantidade de finos existente no solo maior o tempo de compactação necessário em cada patamar para o mesmo grau de compactação. As empresas especialistas na aplicação deste tipo de melhoramento, deverão, em função da sua experiência, indicar os equipamentos e as técnicas mais adequadas a cada situação.

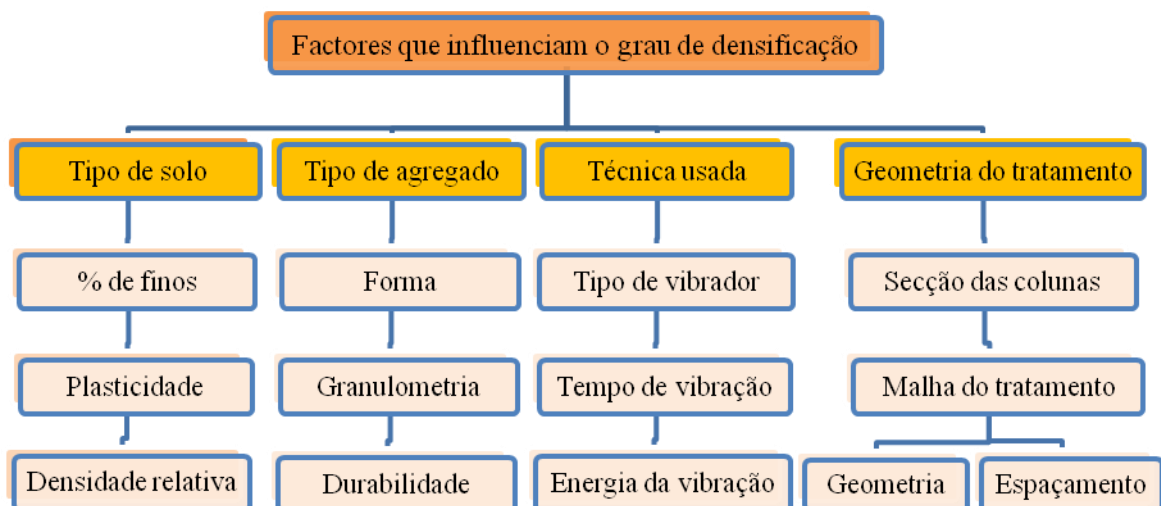


Figura 8: Factores que influenciam o grau de densificação do solo.

3.1.4 Sistemas s-alpha e offshore

Conforme já mencionado, além dos métodos referidos existem alguns idênticos mas com pequenas adaptações, como exemplos podem referir-se o sistema *s-alpha* de abastecimento de brita no fundo do furo e o sistema *offshore*, para os quais se apresentam duas imagens (Figura 9 e Figura 10). O sistema *s-alpha* permite a execução de colunas de brita pelo

método “bottom feed” utilizando uma grua de rastos. Tecnologia desenvolvida pela Keller, que permite eliminar algumas das desvantagens do processo húmido.

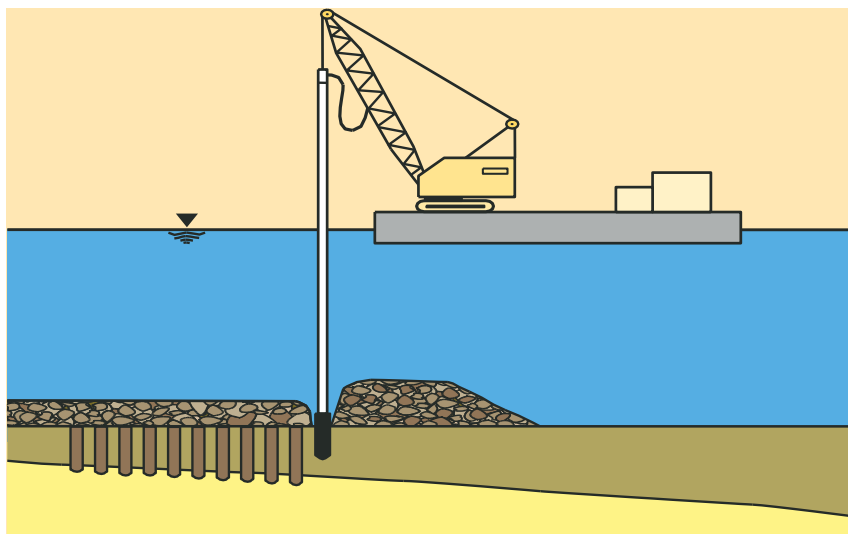


Figura 9: “offshore” de execução de colunas de brita, variante do sistema húmido, (Keller, 2002).



Figura 10: Sistema S-Alpha, que permite a execução de colunas de brita pelo método “bottom feed” com grua de rastos.

3.2 *Equipamento*

O conjunto de equipamentos a mobilizar para o local varia de obra para obra, no entanto o equipamento base é constituído por:

- Grua de rastos (sistema húmido) ou Sonda tipo Vibrocat (sistema seco);
- Vibrador acoplado a tubos de extensão;
- Gerador 250/300 kVA (potência variável conforme o tipo de vibrador a utilizar);
- Compressor;
- Cabos eléctricos, mangueiras, outros acessórios;
- Pá carregadora ou rectro-escavadora (conforme as condições da obra) para colocação de brita;
- Bombas de água de grande capacidade (sistema húmido).

Nas próximas linhas será apresentado um breve resumo dos tipos de vibradores disponíveis actualmente.

Os vibradores podem ser accionados por um motor hidráulico ou eléctrico. Pela acção combinada das vibrações oscilatórias radiais, produzidas pelas massas excêntricas que rodam no interior do vibrador em torno de um eixo vertical e dos movimentos lentos ascendentes e descendentes, os agregados introduzidos no furo são pressionados e compactados contra o solo. Este processo é repetido consecutivamente ao longo da coluna em pequenos patamares, até ao topo da plataforma de trabalho.

Os vibradores disponíveis para a execução das técnicas atrás referidas diferem essencialmente na potência utilizada (a força centrífuga nominal pode variar entre 220 e 700 kN, dependendo do vibrador) e no sistema de alimentação de agregados. A Figura 11 apresenta os dois principais tipos de vibradores, os de “top feed method” e os de “botton feed method”.

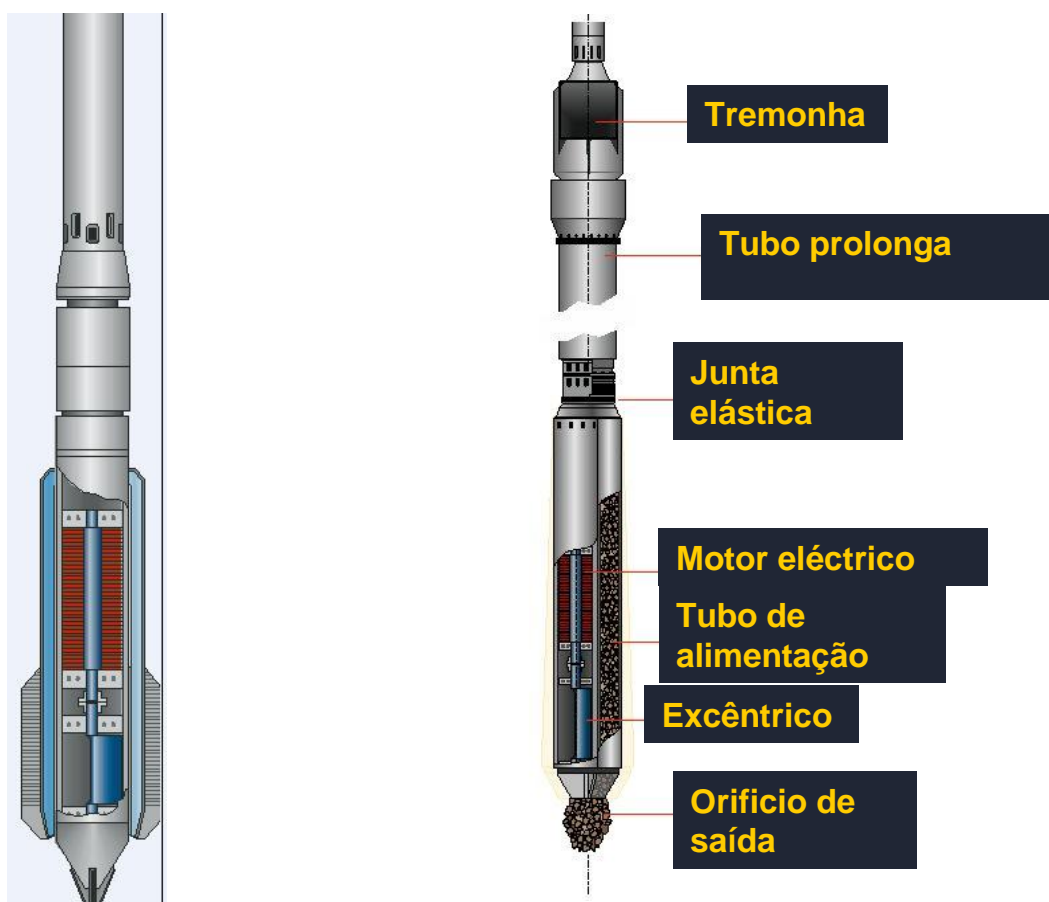


Figura 11: Vibrador utilizado no sistema “top feed method”, à esquerda, Vibrador utilizado no sistema “bottom feed method”, à direita.

3.3 Pré furação

Por vezes é necessário recorrer a pré furação de forma a ultrapassar camadas compactas ou eventuais obstáculos existentes à superfície ou em profundidade. A Figura 12 mostra o exemplo de um equipamento de pré-furação utilizado para ultrapassar camadas superficiais mais compactas.

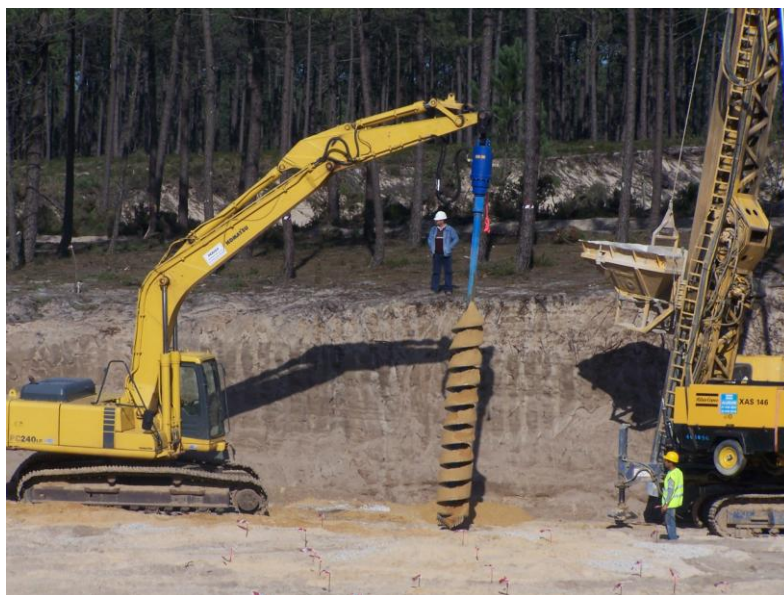


Figura 12: Exemplo de equipamento de pré-furação, com trado de diâmetro mínimo de 600 mm.

3.4 Plataformas de Trabalho e Camadas de distribuição de cargas

Normalmente as plataformas de trabalho são preparadas com materiais granulares muito pouco compressíveis, com espessuras entre 40 a 100 cm. Esta camada cumpre essencialmente três objectivos: i) permitir a deslocação dos equipamentos de execução das colunas de brita em segurança; ii) uma melhor redistribuição de cargas da superfície para as colunas, aproveitando o efeito de arco devido à espessura da plataforma; iii) se for o caso, servirá como camada drenante das águas eventualmente drenadas pelas colunas de brita.



Figura 13: Exemplo de preparação de uma plataforma de trabalho sobre solos muito compressíveis, em que foi aplicado geotêxtil sob uma camada de material britado.

A disposição e construção da plataforma depende dos objectivos a que se destina, no caso de se destinar a melhorar a redistribuição de cargas da superfície para as colunas, poderá ser construída com uma mais camadas envoltas em geotêxtil e/ou geogrelhas (Figura 13) que permitirão uma melhor distribuição das cargas entre as colunas, diminuindo o risco de se obter assentamentos diferenciais.

No caso de se tratar de fundações de pavimentos ou lajes, a parte superior da camada de distribuição (leito do pavimento) deverá ter uma espessura e um módulo de deformabilidade mínimos que garantam a circulação dos equipamentos em segurança. O projectista deverá definir a espessura, características e o módulo de deformabilidade da camada de repartição, tendo também em conta a sua resistência ao punçoamento.

A camada de distribuição de cargas poderá ser executada totalmente ou parcialmente antes da execução das colunas de brita, servindo neste caso de plataforma de trabalho, sendo que o leito de pavimento é normalmente executado após a finalização dos trabalhos de colunas de brita. Normalmente após a execução das colunas a plataforma deverá ser nivelada, repreenchida e recompactada com vibradores de superfície, de forma a garantir as cotas de projecto.

3.5 *Diâmetro das colunas*

O diâmetro das colunas de brita depende do vibrador utilizado e da sua adequabilidade ao tipo de solo existente no local a tratar, do tipo de solos e das suas características geomecânicas, depende também da energia total aplicada na execução da coluna e do tempo de aplicação. Portanto, o diâmetro da coluna pode variar ao longo do seu comprimento, bastando para isso existirem diferentes camadas de solo que ofereçam diferentes resistências.

Os diâmetros normalmente obtidos pelo processo a seco variam entre 50 cm a 80 cm, enquanto que os diâmetros de coluna normalmente obtidos pelo processo húmido são superiores, uma vez que há extracção de solo pela perfuração com água, podendo atingir-se diâmetros superiores a 1,20 m.

3.5.1 *Interface entre solo tratado e a estrutura a construir*

Caso o elemento de fundação não tenha capacidade para distribuir as cargas homogeneamente sobre o solo tratado, será necessário considerar a construção de uma camada de distribuição entre a base do elemento de fundação (ex. sapata) e o solo tratado. Esta camada de distribuição terá por função assegurar complementarmente a distribuição homogénea das cargas.

No caso de ser necessário considerar a acção drenante das colunas, será também necessário considerar a execução de uma camada drenante que assegure a evacuação das águas drenadas pelas colunas.

A execução de sapatas ou lajes sobre colunas de brita deverá ser feita como normalmente se executam para fundações directas sobre o solo natural.

3.6 *Implantação das Colunas de brita*

Em casos onde as cargas são uniformemente distribuídas, as colunas de brita devem ser implantadas segundo uma malha regular quadrada ou triangular. O tipo de malha e o seu espaçamento dependerá das características geotécnicas do solo e das cargas aplicadas. Neste caso deverão ser implantados topograficamente os eixos principais da obra, sendo posteriormente implantada a malha com o recurso a fita métrica.

No caso de sapatas isoladas ou contínuas, o seu dimensionamento será muito condicionado pela tensão admissível e pelos assentamentos máximos permitidos pela estrutura sobre o

solo tratado. A malha de colunas a adoptar resultará da adopção do critério mais desfavorável. Neste caso as colunas deverão ser implantadas com apoio topográfico de forma a evitar desvios significativos que possam comprometer os resultados finais.

3.6.1 Volume de Brita Consumido

É de notar que existe uma diferença entre o volume teórico da brita e o volume de brita efectivamente consumido em obra. Esta diferença deve-se essencialmente a duas razões. Uma parte deve-se ao sobre-consumo devido a perdas durante a execução e/ou a variações nos perfis de solo tratados em profundidade e das consequentes variações de resistência lateral do solo, definindo maiores ou menores diâmetros de coluna. Outra parte fica a dever-se à compactação da brita inerente ao processo de execução.

Portanto ao volume teórico de brita é normalmente adicionado 20% a 30% para determinar o volume de material efectivamente necessário à execução dos trabalhos. No caso de se tratar do método húmido com alimentação da brita a partir da plataforma (*wet system with top feed method*), o sobre-consumo poderá em alguns casos atingir 50 % do volume teórico.

CAPÍTULO 4

ABORDAGEM AO DIMENSIONAMENTO DE OBRAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS COM COLUNAS DE BRITA

4 Abordagem ao dimensionamento de obras de melhoramento de solos com colunas de brita

Este capítulo incide no dimensionamento de obras de melhoramento de solos recorrendo a colunas de brita, apresentando os principais métodos de dimensionamento actualmente usados. Bem como nos aspectos mais importantes do projecto de melhoramento de solos com recurso a esta técnica de tratamento, fazendo uma descrição dos elementos a recolher previamente para a sua execução.

4.1 Orientações para a elaboração de um projecto de melhoramento de solos com colunas de brita de acordo com a norma EN14731 de 2005

No início da elaboração de qualquer projecto deverão averiguar-se de quaisquer restrições legais ou estatutárias; qual a localização dos eixos principais da obra ou pontos de referência coordenados; qual o estado e existência de estruturas, estradas e serviços junto ao local da obra; e por fim, implementar um adequado sistema de qualidade, incluindo a supervisão a monitorização e testes.

Deve também ser obtida informação precisa sobre as condições do locais, nomeadamente: i) geometria do local, incluindo os limites do terreno, topografia, acessos, taludes e inclinações e eventuais limitações de pé direito; ii) estruturas enterradas, contaminantes, e eventuais limitações devidas a vestígios arqueológicos; iii) restrições ambientais, tais como o ruído, vibrações, deslocamentos, poluição e efeitos sazonais provocados pelo clima como seja a existência de camadas superficiais geladas durante parte do ano; iv) actividades previstas para o futuro como rebaixamento de nível freático, construção de túneis, escavações profundas ou construção de aterros. No caso específico da execução de melhoramento de solos a informação necessária deverá sempre compreender: i) projecto específico com descrição dos objectivos do tratamento, necessidades de fornecimento de água e tratamento de lamas.

4.1.1 Prospeccção geotécnica para projecto de melhoramento de solos

Na caracterização das condições geotécnicas dos locais que envolvam melhoramento de solos devem ser seguidas as disposições do Eurocódigo 7 (Projecto Geotécnico), segundo o qual o relatório geotécnico, deve ser composto por dois capítulos, um em que se apresente a informação geotécnica disponível e o segundo onde figure a avaliação dessa mesma informação, salientando os pressupostos seguidos para a obtenção dos parâmetros geotécnicos apresentados no relatório.

No capítulo respeitante à informação geotécnica deverão constar os pontos referentes à informação recolhida e que tem a ver com as condições geológicas e geotécnicas locais. O capítulo referente ao tratamento e avaliação da informação geotécnica deverá incidir sobre eventuais limitações dos trabalhos de campo e/ou de laboratório, indicando se os dados foram insuficientes, comentando a interpretação dos resultados à luz dos procedimentos de amostragem transporte e armazenamento. Caso se justifique, propor a execução de prospeccção complementar, explicitando os objectivos a cumprir, apresentação da gama de valores dos parâmetros geotécnicos para cada estrato. Deve ainda abordar as principais acções prevista, os códigos e as normas a aplicáveis e aspectos a verificar durante a construção que requeiram observação.

A prospeccção geotécnica deverá ser efectuada de acordo com o projecto e com as normas ENV 1997-1, ENV 1997-2 e ENV 1997-3, garantindo sempre que a quantidade de sondagens e a profundidade de investigação seja suficiente para determinar os parâmetros geomecânicos e características geométricas dos maciços característicos do local, assim como a identificação do nível freático. A presença de obstáculos que poderão afectar a execução do tratamento deverão ser claramente identificados, obstruções, camadas duras, níveis de seixos ou calhaus ou ainda blocos, uma vez que nestes casos o meio de tratamento pode não conseguir penetrar ou ultrapassar estes níveis, sendo necessário recorrer a pré-furação ou a outras soluções. Será importante que as seguintes situações, a existirem no local, sejam bem identificadas pela prospeccção geotécnica efectuada:

- a) camadas duras;
- b) solos sensíveis ou com elevados teores de matéria orgânica;
- c) solos com potencial para sofrer assentamentos por colapso provocados pelo aumento do teor de humidade;

- d) solos com potencial de liquefacção sísmica;
- e) existência de aterros em fase de consolidação.

Deverão ainda ser identificados poluentes e contaminantes eventualmente existentes nos solos e/ou nas águas.

Quanto aos aspectos específicos para a aplicação das técnicas de vibração profunda com colunas de brita, deverá ser dada uma atenção especial, por um lado à extensão de solos tratáveis por este método, incluindo localização de eventuais níveis que poderão limitar ou reduzir a eficiência do tratamento; e por outro lado à determinação dos parâmetros físicos e geotécnicos necessários para o correcto dimensionamento do melhoramento de solos por colunas de brita, nomeadamente: compressibilidade; limites de consistência; resistência ao corte não drenada; sensibilidade; módulo de deformabilidade; ângulo de atrito; coesão; peso específico; coeficiente de Poisson.

Existem ainda alguns outros aspectos que devem merecer particular atenção, como sejam: a localização e extensão de turfas e/ou solos orgânicos; ou a existência de aterros biodegradáveis, incluindo resíduos domésticos.

4.1.2 Projecto de melhoramento de solos através de colunas de brita

O projecto de melhoramento de solos por colunas de brita deverá estar de acordo com as normas em vigor nomeadamente, ENV 1991-1, ENV 1997-1, ENV 1997-2 e ENV 1997-3.

Neste deverão estar definidos os objectivos do tratamento a executar deverão constar os parâmetros geomecânicos requeridos para o solo tratado e deve expor-se o critério com base no qual foi definida a profundidade de tratamento, o espaçamento entre colunas e a delimitação das áreas a tratar. Por fim, deve definir claramente os objectivos pretendidos com o melhoramento e os procedimentos de execução, bem como, a forma como o tratamento poderá ser avaliado, em termos de parâmetros de controlo que possam ser medidos durante a execução da obra.

São particularmente importantes nos projectos de melhoramentos de solos através de colunas de brita os seguintes aspectos:

- Devido à natureza heterogénea dos solos, devem ser esperadas variações de comportamento mesmo após o tratamento;

- Os empolamentos ou os assentamentos que ocorram durante a execução das colunas de brita, deverão ser antecipados e ser considerados no projecto da estrutura;
- A utilização do método húmido requer grandes quantidades de água. Os efeitos secundários, se existirem, provocados pela injeção de grandes quantidades de água nos solos deverão ser avaliados e referidos no projecto;
- Avaliar a possibilidade de efeitos adversos nas fundações de edifícios ou estruturas contíguas ao local dos trabalhos. Verificar a possibilidade de quaisquer efeitos em aterros, taludes, muros de retenção, estruturas enterradas. A possibilidade de existirem empolamentos do solo, variação das pressões neutras, e vibrações induzidas no solo durante o tratamento, são aspectos que deverão ser considerados no projecto;
- Em casos onde possa existir o risco de o tratamento provocar efeitos adversos nas estruturas existentes, deverá ser considerado e preparado um plano de instrumentação e monitorização adequado;
- Quando as colunas de brita tiverem também como objectivo a drenagem dos solos, actuando como drenos, deve ser considerada a preparação de uma camada granular de drenagem sobre a plataforma.

Os desenhos de projecto deverão incluir a área de interesse com a implantação dos pontos a tratar, incluindo cortes com as cotas inferiores e superiores de cada ponto. Por seu lado, cada ponto a tratar deverá ser identificado com um número de referência sendo as suas coordenadas referenciadas aos pontos, ou eixos, de referência da obra.

Deve ter-se em atenção que a área a tratar poderá ter de ultrapassar os limites da estrutura a construir, é o caso por exemplo quando o objectivo principal do tratamento é a redução do potencial de liquefacção sísmica dos solos.

A profundidade do melhoramento de solos por colunas de brita deverá ser definida atendendo a que: i) Quando se opta por tratar a espessura dos solos moles, o vibrador deverá atravessar completamente esta camada e penetrar numa camada competente perfeitamente identificada nas sondagens geotécnicas efectuadas no local; ii) Quando se pretende apenas tratar uma parte da massa de solos moles existentes, a profundidade de tratamento deve ser definida de forma garantir a degradação de cargas na espessura de solo tratado. Devendo ainda, cumprir os requisitos de capacidade de carga e assentamentos

diferenciais impostos pela estrutura a construir. O risco de ocorrência de movimentos abaixo da zona tratada deverá ser verificado no projecto.

4.1.3 Indicações do projecto sobre a execução do tratamento

A sequência de execução do tratamento de solos com colunas de brita deve ser definida no projecto ponto a ponto, assim como as direcções do desenvolvimento dos trabalhos ao longo de grandes áreas a tratar, tendo em conta os resultados finais esperados e a presença de estruturas adjacentes.

As plataformas de trabalho deverão ser projectadas de forma a garantir a execução dos trabalhos e a mobilidade do equipamento em condições de segurança. Os materiais utilizados na construção das plataformas de trabalho devem ser adequados à função a que se destinam, não devendo no entanto constituir um obstáculo à penetração do vibrador.

4.2 Dimensionamento

Já foi atrás mencionado que o comportamento de um solo reforçado com colunas de brita não pode ser analisado sem se ter um bom conhecimento da natureza e características do solo a tratar e solo subjacente, informação normalmente obtida através de sondagens geotécnicas, ensaios in situ e ensaios laboratoriais. Também as características dos métodos de execução das fundações, as cargas de serviço e sobrecargas e a natureza e comportamento da estrutura a construir são determinantes no dimensionamento do tratamento de solos através de vibrosubstituição. Nos pontos seguintes serão tratados os aspectos relevantes do dimensionamento das colunas de brita, nomeadamente no que diz respeito aos critérios de dimensionamento, parâmetros de dimensionamento, cargas máximas admissíveis e previsão de assentamentos.

4.2.1 Critérios de dimensionamento

O dimensionamento das colunas de brita é indissociável das características do solo a tratar e do método de execução. O cálculo de dimensionamento deverá reportar-se aos dois critérios seguintes (NFP 11-212):

1. Critério da carga admissível global sobre o solo melhorado - justificação dos diferentes tipos de fundações tendo em conta a ruptura;
2. Critério dos assentamentos totais nos diferentes elementos da estrutura da obra - justificação dos assentamentos diferenciais na estrutura ou entre a estrutura e a laje de

fundação, em função das tolerâncias admissíveis para cada tipo de obra e dos regulamentos em vigor.

Caso existam outras acções a considerar, as respectivas justificações no que diz respeito à resolução do problema através do tratamento deverão ser incluídas na nota de cálculo, designadamente:

- No caso da possibilidade de liquefacção sísmica dos solos, deve ser demonstrado que as colunas de brita diminuem o risco de a liquefacção ocorrer;
- Se o objectivo pretendido é o efeito drenante das colunas para acelerar a consolidação, deverá ser incluído um cálculo com o tempo de consolidação;
- Caso o objectivo seja a estabilização de taludes, deverá ser apresentado o cálculo do factor de segurança obtido ao deslizamento circular.

4.2.2 Parâmetros de dimensionamento

As cargas de exploração da obra (cargas máximas e deformações admissíveis), devem ser definidas no projecto da obra.

Os parâmetros que dizem respeito ao solo são geralmente extraídos do estudo geotécnico, nomeadamente a estratigrafia, natureza dos solos, hidrologia, características reológicas e mecânica (módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, K_0 , índice de compressibilidade C_c , índice de vazios, entre outros) de cada uma das camadas de solo. No caso de os parâmetros serem obtidos através de correlações, devem ser validados por um geotécnico experimentado.

Os parâmetros que dizem respeito às colunas de brita, nomeadamente o módulo de deformabilidade, diâmetro e comprimento, dependem directamente do tipo de material granular seleccionado para a obra. Os parâmetros geomecânicos normalmente utilizados na caracterização das colunas de brita são:

- módulo de deformabilidade
- ângulo de resistência ao corte
- Coeficiente de Poisson
- Peso volúmico do material granular instalado (saturado)

Estes parâmetros tem valores dentro de intervalos mais ou menos fixos dependentes da natureza e granulometria do agregado, no entanto deverão ser verificados através de ensaios.

4.2.3 Cargas máximas admissíveis

O cálculo da carga máxima admissível passa por determinar a carga vertical de ruptura, q_r , de uma coluna isolada, com base nas características da coluna e do solo após o tratamento, e de acordo com os tipos de ruptura que podem ocorrer, a saber:

- ruptura por expansão lateral ou “bulging” (Figura 14-a)
- ruptura por corte no topo da coluna “shallow shear failure” (caso raro, pode ocorrer quando as colunas são curtas, Figura 14-b);
- ruptura por punçoamento, devido a uma insuficiente resistência de ponta ou atrito lateral no caso de colunas flutuantes (Figura 14-c).

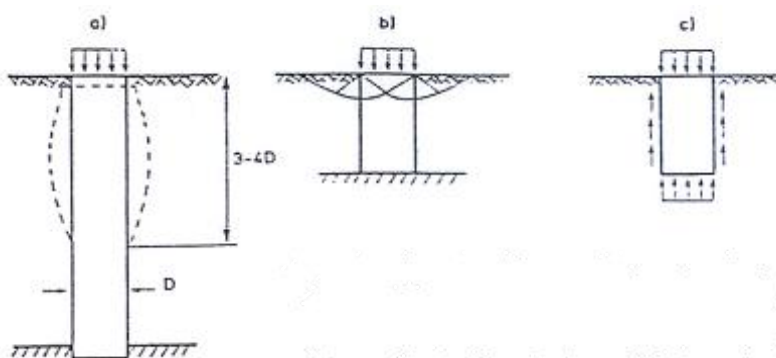


Figura 14: Tipos de ruptura possíveis de ocorrer em colunas de brita (a) por expansão lateral; (b) por corte no topo da coluna, e (c) por punçoamento.

a) cargas máximas para a ruptura por expansão lateral

Por comparação às condições triaxiais, a tensão de ruptura q_{re} por expansão lateral é obtida em função do ângulo de atrito do material da coluna de brita e da tensão lateral máxima, σ'_{hmax} , proporcionada pelo solo, de acordo com (Greenwood, 1970):

$$q_{re} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'_c}{2} \right) \sigma'_{hmax} \quad \text{Eq. 4-1}$$

O valor da tensão lateral máxima do solo pode inferir-se a partir ensaios laboratoriais, como sejam os ensaios triaxiais, ou ensaios in situ, como os ensaios de pressiómetro, penetrômetro estático ou o *Vane test*.

b) ruptura por corte no topo da coluna

Este é um mecanismo idêntico ao de ruptura de uma fundação superficial. Para minimizar a possibilidade de ocorrência deste tipo de ruptura, normalmente substitui-se a camada de solo superficial mau por material granular compactado ou então sobrepõem-se à camada de solo superficial uma camada granular, aumentando por uma lado o peso sobre as colunas e por outro o ângulo de atrito do solo numa parte da potencial superfície de ruptura.

c) ruptura por punçoamento, por insuficiência de resistência de ponta e/ou atrito lateral

A tensão vertical recebida pela coluna de brita é máxima no topo da coluna e decresce em profundidade (Soyez, 1985). Este tipo de ruptura poderá ser evitado se o comprimento das colunas for suficiente para degradar as cargas aplicadas. Num meio caracterizado pela coesão não drenada, c_u , a tensão vertical de rotura, q_{rp} , tendo em conta o punçoamento é calculada da seguinte forma:

$$q_{rp} = 9c_u + L_c \left(2 \frac{c_u}{R_c} - \gamma_c \right) \quad \text{Eq. 4-2}$$

onde,

γ_c : peso volúmico da coluna,

L_c : comprimento da coluna,

R_c : raio médio da coluna.

Na prática, o risco de punçoamento é eliminado atribuindo um comprimento de coluna superior ao valor mínimo que equilibra a resistência do solo definidos pelos estados limites últimos ou de serviço, tal que:

$$L_c \geq R_c$$

$$\text{Estados Limites Últimos - ELU:} \quad L_c \geq R_c \left[\left(\gamma_{ELU} x \sigma_{0ELU} / C_u \right) - 9 \right] / 2 \quad \text{Eq. 4-3}$$

$$\text{Estados Limites de Serviço - ELS:} \quad L_c \geq R_c \left[\left(\gamma_{ELS} x \sigma_{0ELS} / C_u \right) - 9 \right] / 2 \quad \text{Eq. 4-4}$$

Onde, σ_0 é a tensão no topo da coluna, e $\gamma_{ELU} = 1,5$ e $\gamma_{ELS} = 2$.

Tensões admissíveis nos Estados Limites de Serviço

A tensão vertical admissível, q_a , na coluna é obtida por aplicação de um coeficiente de segurança de 2 à tensão vertical de rotura, q_r . A tensão admissível considerada será o menor dos valores entre 0,8 MPa (valor definido pela norma francesa NF P 11 212, DTU 13.2) e a tensão admissível calculada, q_a :

$$q_a = \min\left(0,8\text{MPa}; \frac{q_r}{2}\right) \quad \text{Eq. 4-5}$$

com $q_r = \min(q_{re}; q_{rp})$

Tensão nas colunas nos Estados Limites Últimos

A tensão de cálculo máxima, q_{aELU} obtém-se por aplicação de um coeficiente de segurança de 1,5 sobre a tensão vertical de rotura, q_r .

$$q_{aELU} = \frac{q_r}{1,5} \quad \text{Eq. 4-6}$$

O que será equivalente a afectar de um coeficiente de 1,33 a tensão admissível nos Estados Limites de Serviço, q_a :

$$q_{aELU} = 1,33q_a \quad \text{Eq. 4-7}$$

4.2.4 Malhas de implantação de colunas de brita

Normalmente um solo pode ser considerado tratado por colunas de brita, independentemente dos objectivos do tratamento, a partir de malhas com 9 m² e com uma taxa de substituição superior a 3 %. No caso de uma sapata contínua com uma única fiada de colunas, e sem camada de distribuição, o espaçamento máximo normalmente adoptado é de 2,5 m.

A malha de referência mais apertada é normalmente de 2,4 m². Para sapatas contínuas e para grupos de 2 a 5 colunas, o espaçamento entre eixos mínimo normalmente considerado é de 1,5 e 1,2 m respectivamente. Malhas inferiores a 1,5 m², são possíveis de executar mas necessitam de uma análise de exequibilidade prévia.

No caso das colunas de brita por via húmida, devido à extracção de solo pela perfuração com injeção de água é possível a execução de colunas de brita com diâmetros entre 1 a 1,2 m e com um espaçamento entre eixos inferior ao espaçamentos entre colunas por via seca.

Uma taxa de substituição elevada, normalmente provoca a elevação da plataforma de trabalho, podendo colocar em risco estruturas existentes na zona envolvente.

4.2.5 Fundações directas em aterros construídos sobre colunas de brita

Quando o solo natural é tratado com colunas de brita e posteriormente é construído um aterro controlado sobre o qual serão executadas as fundações da estrutura a construir (Figura 15). A construção e compactação deste aterro deverá ser cuidadosamente controlada.

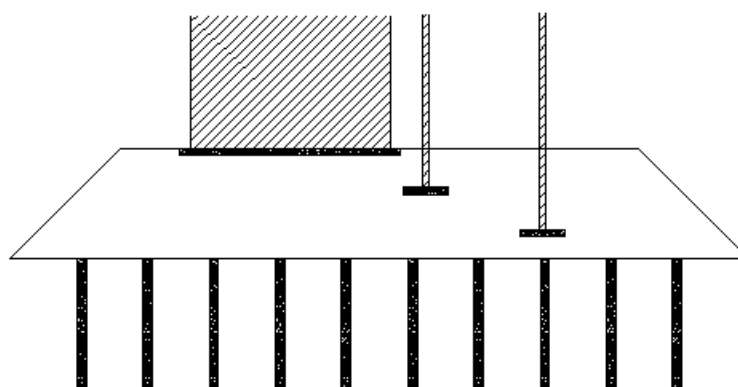


Figura 15: Cota das fundações vs cota do tratamento.

A disposição das colunas de brita deverá ter em conta as tensões geradas pelo aterro e pelas estruturas fundadas no aterro. É necessário ter particular atenção no dimensionamento quando a espessura do aterro for inferior a metade do espaçamento entre colunas.

4.2.6 Avaliação das tensões e dos assentamentos

Os métodos aqui descritos, só são, em princípio válidos, para casos em que a sobrecarga no solo entre as colunas seja inferior à tensão admissível para o solo não tratado (NFP 11-212, DTU 13,2).

No caso particular de fundações submetidas a um carregamento uniforme e infinito a aproximação simplificada ao problema, considera um solo com comportamento elástico e formado por camadas horizontais planas, considera ainda que as colunas são executadas até uma camada mais compacta em profundidade.

Após a execução das colunas de brita, o assentamento de cada camada i , ao centro da camada, obtém-se através da fórmula seguinte:

$$w_i = \frac{h_i x \sigma_i}{a_i E_{col} + \left\{ (1 - a_i) E_{si} (1 - \nu_{si}) / (1 - \nu_{si} - 2\nu_{si}^2) \right\}} \quad \text{Eq. 4-8}$$

e o valor da tensão na coluna ao nível da camada i (σ_{ci}), pode ser calculado por:

$$\sigma_{ci} = \frac{E_{col} x \sigma_i}{a_i E_{col} + \left\{ (1 - a_i) E_{si} (1 - \nu_{si}) / (1 - \nu_{si} - 2\nu_{si}^2) \right\}} \quad \text{Eq. 4-9}$$

em que:

a_i : percentagem de incorporação (secção da coluna), na camada i considerada;

E_{col} : modulo de deformabilidade da coluna;

E_{si} : modulo de deformabilidade da camada i considerada;

ν_{si} : coeficiente de Poisson da camada i ;

σ_i : tensão vertical média imposta pela estrutura a construir.

O valor obtido para a tensão na cabeça da coluna deverá ser inferior ao valor máximo admissível:

$$\sigma_c < q_a$$

E o assentamento total $\sum w_i$ considerando, se for o caso, as camadas moles sob a base da coluna terá de ser inferior aos valores fixados para as condições de utilização. No caso das cargas variarem por zonas e/ou a estratigrafia ser heterogénea, é necessário verificar se os assentamentos diferenciais são aceitáveis.

No caso particular de elementos de fundação tipo sapatas submetidas a um carregamento vertical centrado, a aproximação simplificada ao problema considera um solo com comportamento elástico e a hipótese de camadas horizontais planas, assume ainda que as colunas são executadas até uma camada mais compacta em profundidade. Neste caso o calculo dos assentamentos pode ser feito através do procedimento francês o qual pode ser analisado em detalhe na Norma DTU13.2.

4.2.7 Caso particular de obras de aterros

O dimensionamento do tratamento por colunas de brita para obras de aterros é idêntico ao aplicado a lajes de betão, onde as cargas são uniformes e distribuídas. No dimensionamento das obras de aterros poderá ser necessário verificar a estabilidade à rotura por deslizamento dos solos de fundação. Para esta situação é necessário distinguir as seguintes situações:

- o modelo inicial antes da aplicação da carga sobre o solo;
- o modelo correspondente à fase aplicação da carga (fase de drenagem do maciço);
- o modelo final correspondendo ao final da drenagem.

Neste âmbito, PRIEBE (1978) propôs soluções de homogeneização que de acordo com MITCHEL (1981), podem ser aplicadas numa situação a longo prazo, isto é correspondendo ao modelo do final da drenagem do maciço de solo, permitindo assim obter um modelo homogéneo equivalente simplificado.

Esta abordagem simples não permite considerar o mecanismo de transferência de cargas e poderá sub-estimar o coeficiente de segurança quando a taxa de incorporação cresce.

4.2.8 Outros métodos de dimensionamento

4.2.8.1 Método numérico dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é método numérico que pode ser utilizada para resolver problemas na área da geotecnia. Com base neste método, têm sido desenvolvidos programas de computador para resolver os problemas da interacção solo/estrutura, construção de barragens, hidrogeologia, entre outros.

Os métodos tradicionais de análise, muitas vezes usam técnicas baseadas em pressupostos que simplificam demasiado o problema. A estes métodos simplificados falta a possibilidade de contabilizar todos os factores e variáveis inerentes ao problema, o que poderá limitar a precisão dos resultados. O MEF pode em muitos casos suprimir este problema, oferecendo por isso vantagens em relação aos métodos de cálculo tradicionais, nomeadamente a consideração de geometrias complexas, diversas condições de carregamento, comportamento não linear de materiais, distribuição heterogénea de materiais, efeitos resultantes da interacção solo-estrutura; todas estas situações não são contempladas nos métodos de cálculo tradicionais.

Este método oferece a vantagem de obter todos os parâmetros do modelo geométrico e geológico inicialmente definido, nomeadamente deslocamentos, deformações, tensões, linhas de iso valores e zonas de plastificação.

No entanto, e apesar dos resultados possíveis de obter com este método, é necessário ter uma atenção especial no que toca à modelação de colunas de brita nas condições limite, uma vez que os resultados finais dependem do modelo reológico e dos seus parâmetros geomecânicos (módulo de Young, Coeficiente de Poisson, C_c , C_s , entre outros). Assim, os valores de entrada do modelo deverão ser determinados com confiança antes de serem aplicados.

4.2.8.2 Métodos de Homogeneização

Os métodos de homogeneização têm a vantagem de simplificar o meio compósito solo + colunas, com o objectivo de obter um modelo simplificado, onde o solo tratado é reduzido a um solo de homogeneidade equivalente. Esta técnica foi utilizada inicialmente por PRIEBE (1978) para efectuar cálculos de estabilidade de obras de terra sobre solos moles tratados por colunas de brita.

4.2.9 O método de PRIEBE

O método de Priebe sendo o método mais vulgarmente utilizado, vai merecer neste trabalho uma descrição mais detalhada. O que a seguir se apresenta é essencialmente baseado na publicação de Heinz Pribe *The Design of Vibro replacement*, publicada na revista *Ground Engineering* em Dezembro de 1995.

No caso da vibrosubstituição por colunas de brita provar que o tratamento preconizado para determinada situação cumpre os objectivos definidos no projecto, apenas pode ser efectuado através de onerosos ensaios de carga em escala real. No entanto, podem ser obtidas conclusões fiáveis acerca do grau de melhoramento resultante apenas considerando a existência das colunas de brita, sem considerar a densificação do solo entre as colunas. Isto é possível porque os parâmetros essenciais da geometria do modelo a considerar e do material britado para execução das colunas podem ser determinados com bastante precisão. Neste tipo análise para atribuição das propriedades do solo, o equipamento e os procedimentos de execução desempenham apenas um papel secundário na estimativa do diâmetro das colunas de brita.

Deve ser salientado que o método de dimensionamento se baseia no efeito de melhoramento do solo pela execução das colunas de brita.

Num primeiro passo, é estabelecido um factor indicativo do grau de melhoramento do solo provocado pelas colunas de brita em oposição, ou comparação com o mesmo solo sem colunas de brita. De acordo com o factor de melhoramento referido, o módulo de deformabilidade do solo compósito é aumentado diminuindo assim os assentamentos esperados. Todos os seguintes passos de dimensionamento, se baseiam neste princípio.

Em muitos casos práticos, o efeito de reforço produzido pelas colunas de brita executadas por vibrosubstituição, é reforçado pela densificação provocada pelo efeito de vibrocompactação, quer isto dizer que a instalação de colunas de brita, densifica o solo entre as colunas, essencialmente em solos arenosos. Nestes casos, poderá em primeiro lugar ser avaliada a densificação provocada pela vibrocompactação e só depois (considerando os parâmetros geomecânicos do solo melhorado), proceder ao dimensionamento de colunas de brita segundo o que se descreve seguidamente.

Determinação do factor de melhoramento básico

A técnica de vibrosubstituição é relativamente complexa, permitindo apenas uma avaliação mais ou menos precisa para o caso bem definido de uma área de carregamento ilimitada e uma malha de colunas igualmente ilimitada. Na situação referida considera-se uma célula unitária com a área A , composta pela coluna de brita de secção AC , e a respectiva área de solo envolvente, correspondente à zona de influência da coluna.

São considerados os seguintes pressupostos:

- a coluna estará fundada numa camada rígida;
- o material constituinte da coluna é incompressível;
- a densidade aparente da coluna e do solo são desprezados

Então, a coluna não pode ceder pela ponta, e qualquer assentamento da área carregada resulta da deformação lateral da coluna que se mantém constante ao longo de todo o seu comprimento.

A avaliação do melhoramento de um solo com colunas de brita, nas condições atrás referidas, é efectuada partindo do princípio de que o material da coluna é submetido a

tensões tangenciais desde o início, e que o solo envolvente da coluna reage elasticamente. Assume-se ainda que o solo é de tal forma deslocado durante a instalação das colunas de brita, que a sua resistência inicial corresponderá ao estado líquido, isto é o coeficiente de pressão de terras é de $K = 1$. O resultado da avaliação expressa-se pelo factor de melhoramento n_0 .

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} * \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{ac} * f(\mu_s, A_c/A)} - 1 \right] \quad \text{Eq. 4-10}$$

onde,

$$f(\mu_s, A_c/A) = \frac{(1 - \mu_s) * (1 - A_c/A)}{1 - 2\mu_s + A_c/A} \quad \text{Eq. 4-11}$$

$$K_{ac} = \tan^2(45^\circ - \varphi_c / 2) \quad \text{Eq. 4-12}$$

Na maioria dos casos, um valor de Coeficiente de Poisson de $\mu_s = 1/3$ é o valor adequado para o estado final, após o assentamento, e que conduz a uma expressão simplificada:

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} * \left[\frac{5 - A_c/A}{4 * K_{ac} * (1 - A_c/A)} - 1 \right] \quad \text{Eq. 4-13}$$

A relação entre o factor de melhoramento n_0 , a relação entre as áreas A/A_c , juntamente com o ângulo de atrito da brita utilizada (φ_c), que entra na derivação, está ilustrado na Figura 16.

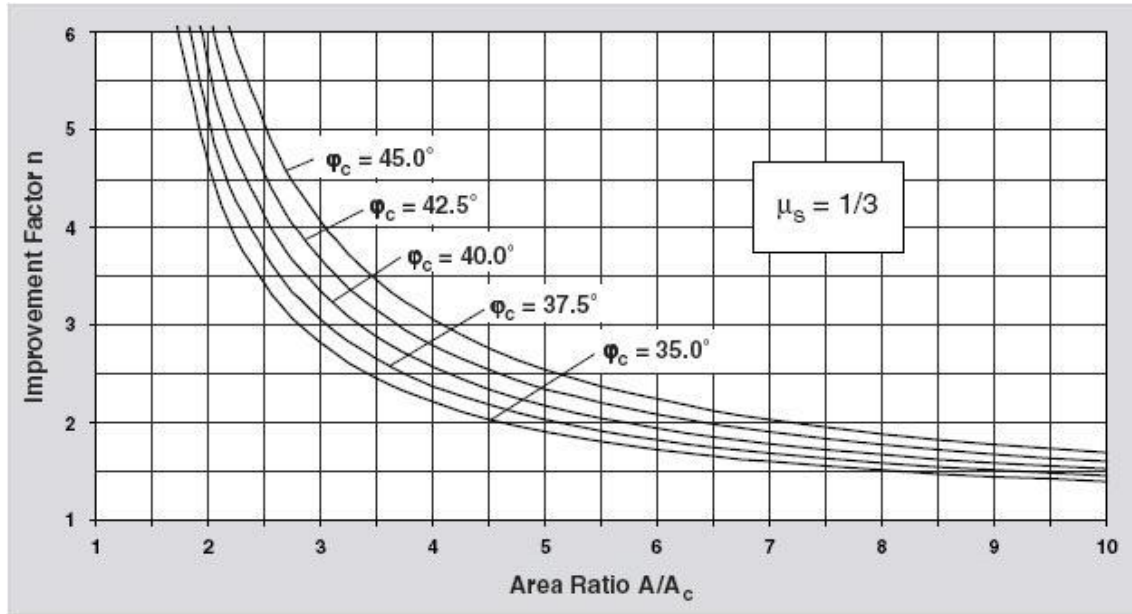


Figura 16: Gráfico de dimensionamento para colunas de brita (Priebe, 1995).

Considerações sobre a Compressibilidade da Coluna

Apesar de um dos pressupostos de aplicação do método de Priebe se referir à incompressibilidade da coluna, a verdade é que a coluna apresenta alguma compressibilidade, daí que qualquer carga provoca assentamentos que não estão relacionados com a deformação lateral da coluna. Então, no caso da substituição total do solo, em que $A/A_c = 1$, o grau de melhoramento do solo não atinge um valor infinito como determinado teoricamente para um material não compressível, coincidindo na melhor das hipóteses com a relação entre os módulos de deformabilidade do material constituinte da coluna e do solo.

A compressibilidade do material da coluna pode ser considerada no cálculo aplicando um factor de redução do grau de melhoramento n_I que é obtido a partir da expressão desenvolvida para a determinação do grau de melhoramento n_0 sendo a relação entre as áreas da malha e da secção da coluna A/A_c aumentada por uma quantidade adicional de $\Delta(A/A_c)$

$$n_I = I + \frac{\overline{A_c}}{A} * \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c}/A)}{K_{ac} * f(\mu_s, \overline{A_c}/A)} - I \right] \quad \text{Eq. 4-14}$$

onde,

$$\frac{\overline{A_c}}{A} = \frac{I}{A/A_c + \Delta(A/A_c)} \quad \text{Eq. 4-15}$$

$$\Delta(A/A_c) = \frac{I}{(A_c/A)_I} - I \quad \text{Eq. 4-16}$$

Utilizando o gráfico da Figura 16 este procedimento corresponde a uma alteração da origem das coordenadas no eixo das abcissas. Assim o factor de melhoramento n_I , a ser obtido através do diagrama referido, inicia-se com a relação dos módulos de deformabilidade e não a partir de um valor infinito.

A quantidade adicional da relação $\Delta(A/A_c)$ dependente da relação dos módulos de deformabilidade (D_c/D_s), pode ser facilmente obtido a partir do gráfico da Figura 17.

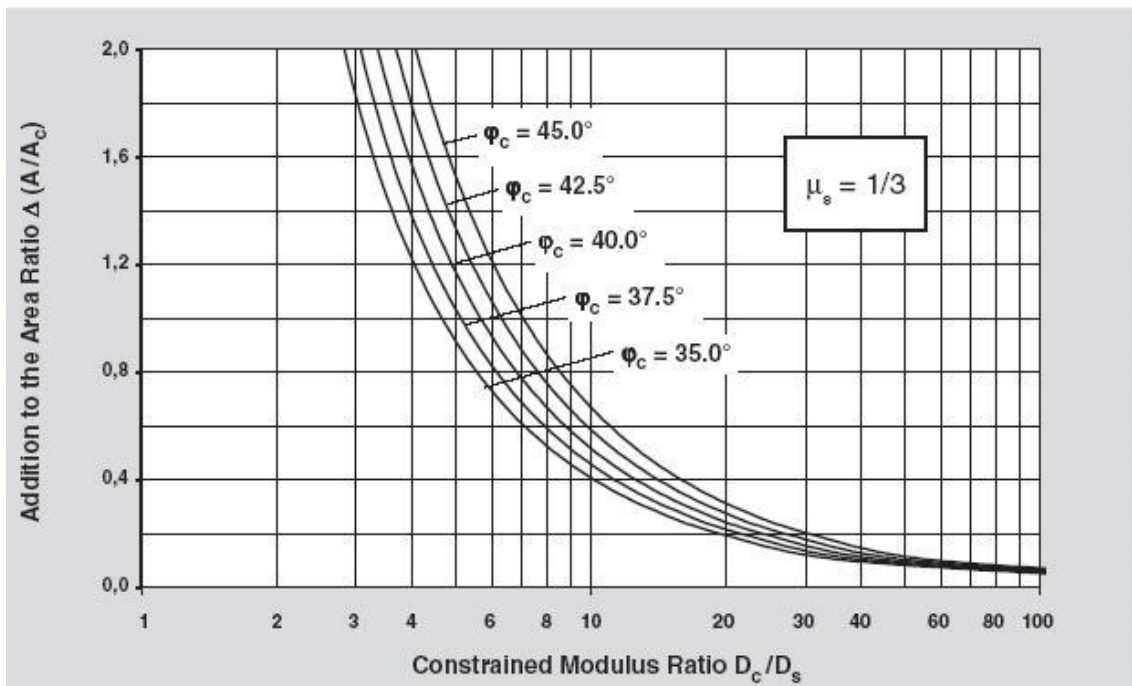


Figura 17: Acréscimo de A/Ac considerando a compressibilidade da coluna (Pribe, 1995).

Consideração sobre os terrenos de cobertura

Ao desprezar a densidade aparente da coluna e do solo significa que a diferença das pressões iniciais entre a coluna e o solo envolvente, que provoca a deformação lateral da coluna, depende apenas da distribuição da carga p aplicada nas colunas e no solo, e que é constante ao longo de todo o comprimento da coluna.

Uma vez que o peso das colunas W_c e do solo W_s poderão exceder consideravelmente o valor das cargas externas, estes terão de ser adicionado no cálculo. Considerando estas

cargas adicionais a diferença entre as pressões iniciais decresce assintoticamente sendo a deformação lateral da coluna reduzida na mesma proporção. Ou seja, com o aumento das pressões de confinamento impostas pelos solos de cobertura, as colunas de brita são melhor suportadas lateralmente, aumentando assim a sua capacidade de carga.

Uma vez que diferença de pressões é um parâmetro linear nas derivações do factor de melhoramento, o factor de profundidade fd , fornece-nos um valor através do qual é aumentado o factor de melhoramento n_1 . A partir do factor de profundidade, fd , é obtido um valor que aumenta o grau de melhoramento definido como n_2 ,

$$factor\ n_2 = fd \times n_1$$

Por exemplo, a uma profundidade onde a diferença de pressão atinge 50% apenas entre o valor inicial, o factor de profundidade será $fd = 2$.

O factor de profundidade fd é calculado assumindo o decréscimo linear da diferença de pressão, como resulta das linhas de pressão $((p_c + \gamma_c * d) * K_{ac}$ e $(p_s + \gamma_s * d) (K_s=1)$).

No entanto terá de ser considerado que com a diminuição das deformações laterais o coeficiente de pressão das colunas passa em profundidade do valor activo K_{ac} para o valor passivo K_{oc} . Até atingir a profundidade em que a linha vertical (assumida para a diferença de pressões) é intersectada pela linha assintótica da variação das pressões, o factor de correcção fica do lado da segurança. Na prática, a profundidade de tratamento é quase sempre inferior à profundidade de intercepção das linhas. No entanto de forma a garantir que ficamos sempre do lado da segurança, é aconselhável não incluir nas derivações a carga exterior no solo p_s .

$$fd = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - W_s / W_c * \frac{W_c}{p_c}}{K_{oc}}} \quad \text{Eq. 4-17}$$

onde:

$$p_c = \frac{p}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - A_c/A}{p_c/p_s}} \quad \text{Eq. 4-18}$$

$$\frac{p_c}{p_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c/A})}{K_{oc} \cdot f(\mu_s, \overline{A_c/A})} \quad \text{Eq. 4-19}$$

$$W_c = \sum(\gamma_c \cdot \Delta d) \quad \text{Eq. 4-20}$$

$$W_s = \sum(\gamma_s \cdot \Delta d) \quad \text{Eq. 4-21}$$

$$K_{oc} = 1 - \sin \varphi_c \quad \text{Eq. 4-22}$$

O diagrama simplificado Figura 18 considera que o peso específico, γ , da coluna e do solo é o mesmo o que não é uma perspectiva pelo lado da segurança, portanto neste diagrama deve ser sempre tomado o valor inferior, ou seja o peso específico do solo, γ_s .

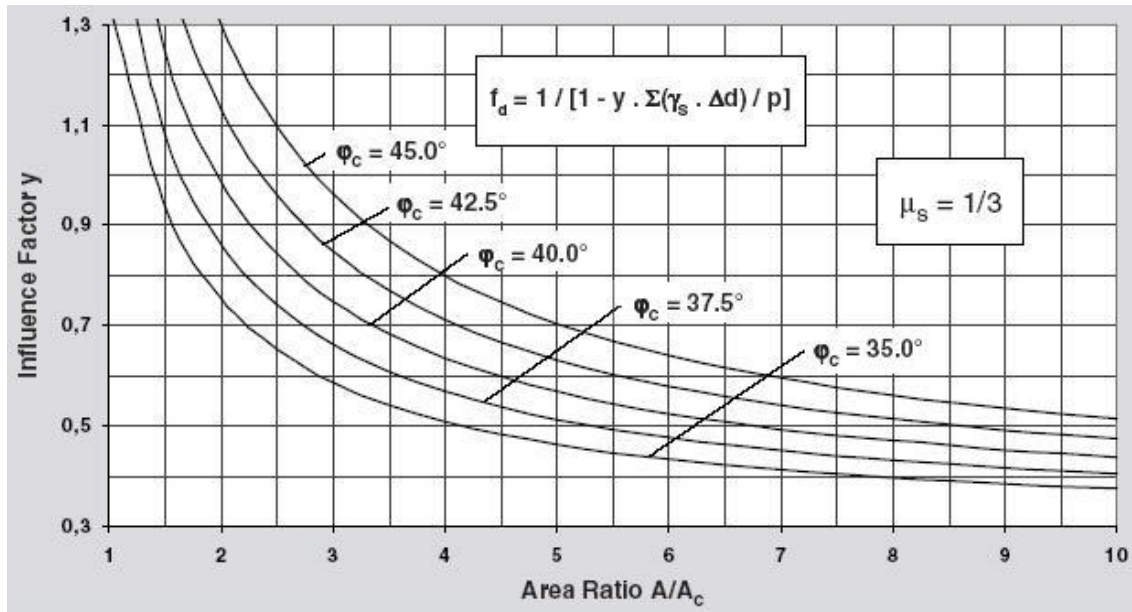


Figura 18: Ábaco para determinação do factor de profundidade (Pribe, 1995).

As diferentes fases do cálculo conforme descritas até aqui, não se encontram ligadas matematicamente, e contêm simplificações e aproximações. Neste sentido, deverão ser utilizados alguns mecanismos de controlo de forma a garantir que cada coluna não deverá receber mais carga do que a que consegue receber de acordo com a sua compressibilidade. A determinadas profundidades o suporte garantido pelo solo atinge valores tais que as colunas deixam de sofrer deformação lateral. No entanto mesmo nessas situações o factor de profundidade não aumenta indefinidamente conforme resulta da já referida assunção da diminuição linear da diferença de pressões.

De acordo com o exposto, é necessário limitar o factor de profundidade, limitando assim a carga transmitida às colunas de modo a que o assentamento inerente à sua compressibilidade não exceda o assentamento do sistema compósito (solo + colunas). Este controlo aplica-se quando o solo existente é considerado muito denso ou rijo,

$$fd \leq \frac{D_c / D_s}{p_c / p_s} \quad \text{Eq. 4-23}$$

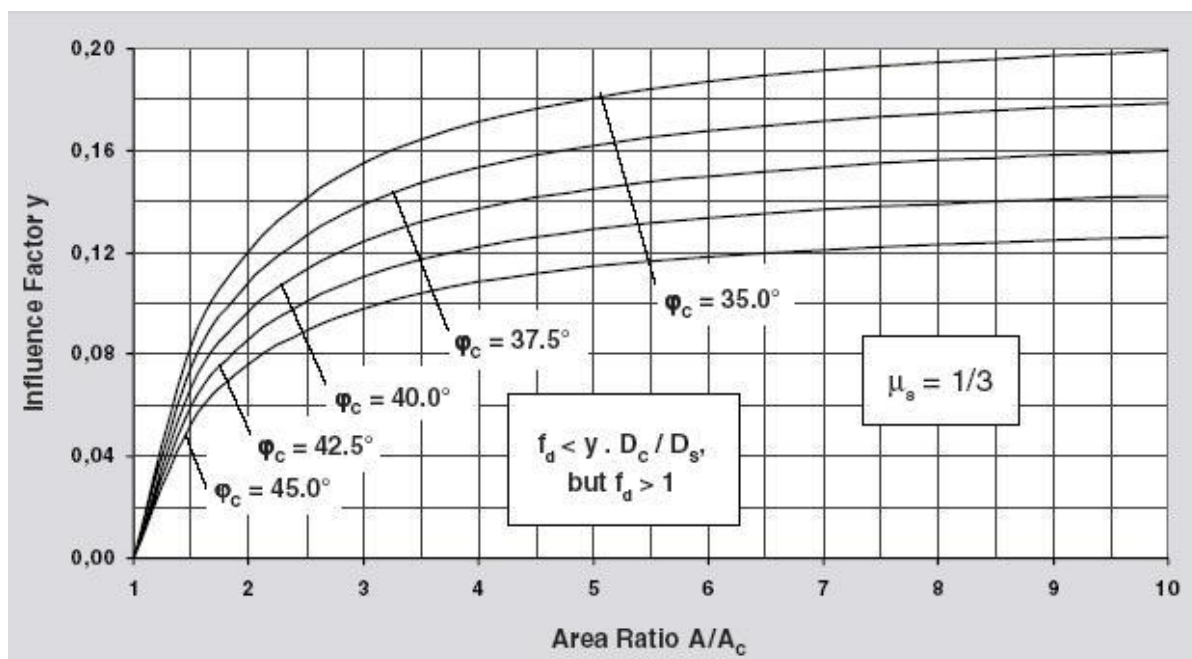


Figura 19: Valor limite do factor de profundidade (Pribe, 1995).

O valor máximo do factor de profundidade pode ser retirado do gráfico da Figura 19. Um valor de $fd < 1$ não deve nunca ser considerado válido, mesmo que seja o resultado do cálculo efectuado. Neste caso é necessário um Segundo mecanismo de controlo, relacionado com o valor máximo que o factor de melhoramento pode tomar. De certa forma este controle assemelha-se ao primeiro, garante que o assentamento das colunas, resultando da sua inerente compressibilidade não ultrapassa o assentamento resultante da compressibilidade do solo envolvente, considerando a repartição das cargas pelas colunas e pelo solo. Este segundo mecanismo de controlo aplica-se quando o solo existente é muito solto ou mole.

$$n_{\max} = 1 + \frac{Ac}{A} * \left(\frac{Dc}{Ds} - 1 \right) \quad \text{Eq. 4-24}$$

Tem de ser salientado que a razão Ac / A deve ser utilizada na equação 4-24 e não a razão modificada \overline{Ac} / A .

Resistência ao corte do solo melhorado

A resistência ao corte do solo melhorado por colunas de brita é normalmente muito favorável. Enquanto que sob tensões de corte os elementos rígidos, como estacas podem partir em cascata, as colunas de brita deformam-se até o excesso de carga ser transferido para as colunas vizinhas. Por exemplo uma rotura circular de terras num solo melhorado com colunas de brita, não ocorre sem antes a capacidade de carga de todas as colunas em conjunto ser excedida. As colunas de brita recebem uma parte significativa da carga total m dependendo da relação entre as áreas A_c / A e do factor de melhoramento n .

$$m = \left(n - 1 + \overline{A_c / A} \right) / n \quad \text{Eq. 4-25}$$

Simplificando, os procedimentos de projecto recomendados não consideram a redução de volume do solo envolvente causado pela deformação lateral das colunas. Então e particularmente para casos com elevadas relações entre as áreas A_c / A , o solo recebe uma parte maior da carga em relação ao valor calculado. De forma a não sobre estimar a resistência ao corte das colunas durante a ponderação com base na distribuição da carga entre as colunas e o solo, a carga proporcional nas colunas tem de ser reduzida, utilizando a seguinte aproximação:

$$m' = (n - 1) / n \quad \text{Eq. 4-26}$$

O gráfico da Figura 20 mostra nas linhas a cheio a carga proporcional nas colunas m' e nas linhas a tracejado a carga proporcional nas colunas m , sem redução

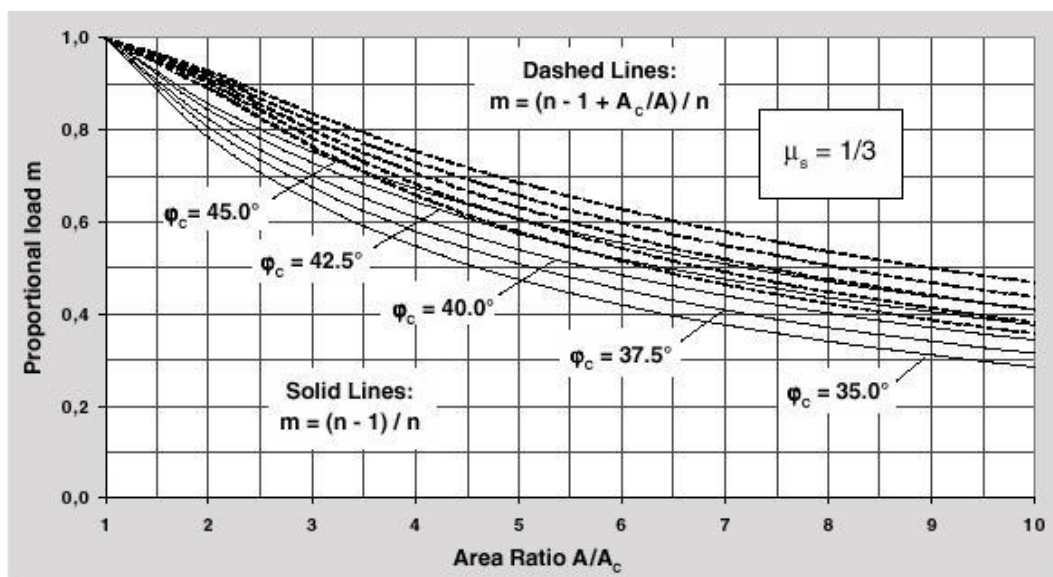


Figura 20: Carga proporcional nas colunas de brita (Pribe, 1995).

De acordo com as cargas proporcionais nas colunas e no solo, a tensão de corte por fricção do sistema compósito pode ser facilmente estimada:

$$\tan \bar{\varphi} = m' \tan \varphi_c + (1 - m') \tan \varphi_s \quad \text{Eq. 4-27}$$

Uma vez que na maioria dos casos práticos as possíveis linhas de rotura circular podem encontrar-se a diferentes profundidades, o que se torna difícil de controlar, é recomendado utilizar o factor de profundidade apenas em casos bem definidos, portanto, deve-se efectuar o cálculo atrás mencionado considerando m_1' relacionada com n_1 e não com m_2' que está relacionada com o factor $n_2 = f_d \cdot n_1$, obtido a partir do factor de profundidade f_d .

A coesão do sistema compósito depende da relação entre a área da secção da coluna e a área de influência da mesma, $\overline{Ac / A}$.

$$c = \left(1 - \overline{Ac / A}\right) c_s \quad \text{Eq. 4-28}$$

A instalação de colunas de brita pode provocar danos na estrutura do solo difíceis de prever, portanto por razões de segurança parece ser aconselhável considerar a coesão proporcional à carga, ou seja, muito baixa (Priebe chama a atenção para o facto de esta proposta não ser baseada em aspectos mecânicos).

$$c' = (1 - m') c_s \quad \text{Eq. 4-29}$$

4.2.10 Método observacional de previsão de assentamentos proposto por Asaoka (1978)

Na tentativa de ultrapassar os problemas inerentes à estimativa dos assentamentos pela formulação clássica, sejam provocados pela dificuldade na determinação dos parâmetros geomecânicos sejam inerentes à definição da geometria, Akira Asaoka em 1978 (Asaoka, 1978), por aplicação do método observacional, desenvolveu um procedimento expedito para efectuar o controlo da evolução de assentamentos de aterros sobre solos moles, permitindo fazer uma previsão do valor dos assentamentos no final da consolidação.

O Método Observacional foi apresentado formalmente por Ralph Peck em 1969, e muito sucintamente consiste, mediante o cumprimento de algumas regras, na definição de um plano de observação detalhado cujos resultados permitirão decidir, caso necessário,

eventuais modificações ao projecto (Caldeira e Maranha-Neves, 2009). No Eurocódigo 7 (EN 1997-1, 2007) refere-se que: “Quando a previsão do comportamento geotécnico seja difícil pode ser apropriado adoptar o chamado método observacional, no qual o projecto é revisto durante a construção”.

Asaoka, definiu um procedimento observacional para previsão de assentamentos de aterros sobre solos moles. Este procedimento foi desenvolvido através de dois métodos práticos, o primeiro consiste numa abordagem probabilística (Inferência Bayesiana do processo estocástico não estacionário) o segundo um método gráfico. Neste trabalho apenas nos referimos ao método gráfico.

A metodologia foi desenvolvida também tendo em vista a sua aplicação a casos de solos tratados com colunas de areia, o que torna possível a sua aplicação directa no caso das colunas de brita, conforme demonstrado no capítulo 6 deste trabalho.

Tratando os dados dos assentamentos registados durante e após a construção do aterro, o método de Asaoka permite prever os assentamentos totais expectáveis e estimar o tempo necessário para atingir esse valor de assentamento. Segundo (Frank, 2006) este método permite normalmente a obtenção de estimativas satisfatórias dos assentamentos finais e pode ser recomendado a todos os casos de consolidação unidimensional ou radial de maciços de solo homogéneo.

Este método poderá ser aplicado a solos tratados com drenos ou colunas de areia ou brita, permitindo obter o Coeficiente de consolidação do solo melhorado e confirmar ou caso necessário ajustar os cálculos dos assentamentos e tempos previstos inicialmente.

Em projectos de maiores dimensões, que envolvam solos moles, poderá ser importante efectuar ensaios de consolidação com aterros, permitindo assim testar diferentes soluções de carregamento e/ou melhoramento de solos e em simultâneo permitir a obtenção de parâmetros geomecânicos dos solos a partir dos resultados observados.

Este tipo de ensaios prévios pode ser muito importante dadas as dificuldades de caracterização das propriedades mecânicas (representatividade dos resultados) e geométricas deste tipo de solos, (estratificação com espessuras variáveis e muitas vezes lateralmente descontínuas).

Para a aplicação deste método deverá ser considerado o registo da variação temporal da altura do aterro e a caracterização geotécnica dos materiais constituintes do aterro, assim como a instalação de instrumentação que permita a obtenção dos valores dos

assentamentos verticais e horizontais, e das pressões de água no solo ao longo do desenvolvimento da obra. Para o registo dos dados deverão ser consideradas campanhas de observação com intervalos regulares a definir pelo projectista.

Segundo Magnan e Deroy (1980), que desenvolveram e complementaram o trabalho de Asaoka, este método permite na grande maioria dos casos resolver a indefinição da determinação do coeficiente de consolidação e do índice de compressibilidade, por se direccionar objectivamente para uma lei de tendência, cuja convergência depende da forma e não dos valores absolutos dos assentamentos.

O método proposto por Asaoka, consiste numa construção gráfica baseada na curva do assentamento ao longo do tempo à superfície do solo, preferencialmente sob o eixo da superfície carregada. Esta curva será normalmente representada em coordenadas lineares “assentamentos-tempo” (Figura 21).

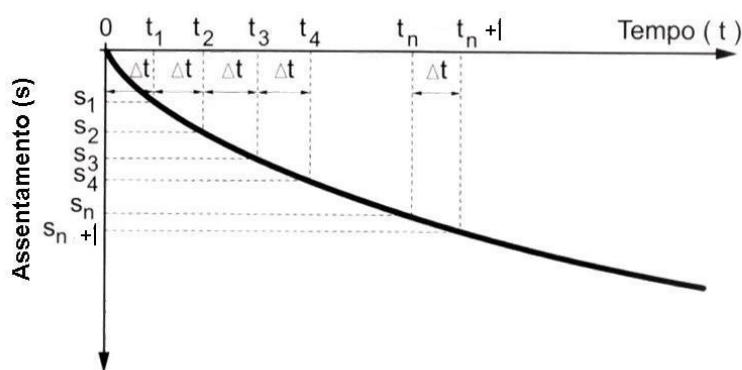


Figura 21: Curva de assentamento no tempo, adaptado de Magnan e Deroy, 1980.

Define-se um intervalo de tempo Δt (normalmente, de 30 a 100 dias) e define-se a sequência aritmética de tempos $\{t_n\}_{n=1,2,\dots} = \{n\Delta t\}_{n=1,2,\dots}$. Após esta definição efectua-se as leituras dos assentamentos $\{s_n\}$ correspondentes aos tempos $\{t_n\}$, devendo os resultados ser dispostos num quadro, conforme o Quadro 3 abaixo.

Quadro 3: Valores utilizados na construção de Asaoka

t (unidade)	t_1	t_2	t_3	t_n	t_{n+1}
S (unidade)	S_1	S_2	S_3	S_n	S_{n+1}

Colocam-se em gráfico os pontos de coordenadas (S_{i-1}, S_i) , assim como a bissetriz que corresponde às coordenadas $(S_{j-1} = S_j, S_j = S_{j-1})$, conforme o gráfico da Figura 22:

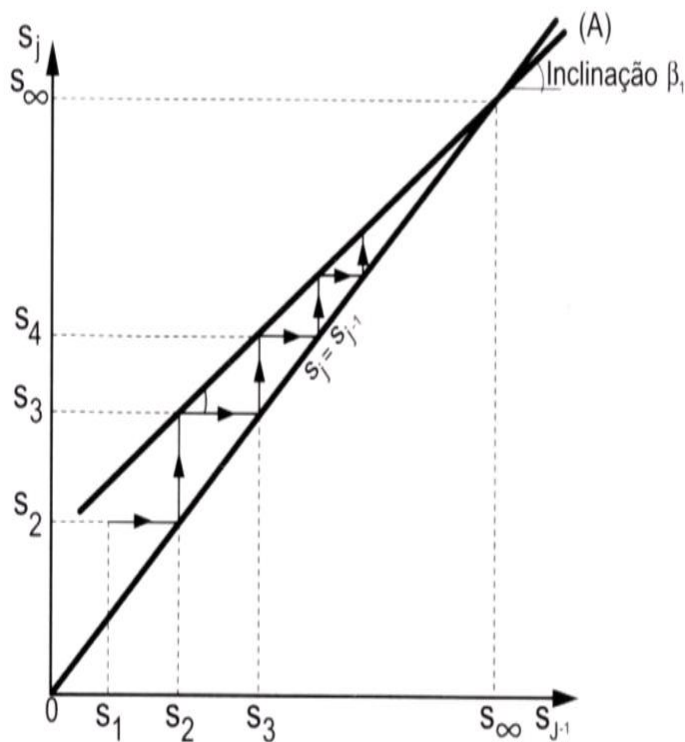


Figura 22: Construção de Asaoka (Magnan e Deroy, 1980).

A linha (A) que une os pontos dos registos experimentais é traçada e a sua intersecção com a bissetriz corresponderá ao valor final do assentamento, S_∞ . A inclinação da linha (A), designada no gráfico por β_1 , está directamente relacionada com a velocidade de consolidação. Esta solução terá grande reprodutibilidade em carregamentos uniformes e instantâneos (solução de Terzaghi) ou progressivos (solução de Schiffman), ambos unidimensionais.

Em alguns casos este método pode ainda ser aplicado na análise da consolidação secundária ou fluência, principalmente quando o efeito deste fenómeno é grande e se manifesta muito cedo. Nestes casos pode-se traçar duas rectas de tendência, uma para o primeiro grupo de pontos correspondendo à consolidação primária (A), e uma segunda recta de tendência (B), para o conjunto de pontos correspondente aos assentamentos observados já na fase de consolidação secundária, como se exemplifica na Figura 23. A pendente aumenta, de A para B, quando o coeficiente de consolidação diminui, associando-se a mudança de pendente à conclusão da consolidação primária e a passagem a uma fase de consolidação secundária.

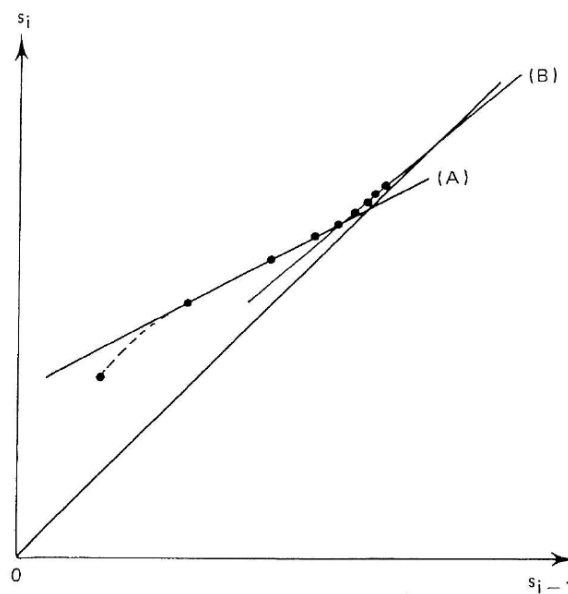


Figura 23: Construção de Asaoka em caso de fluência (Magnan e Deroy, 1980).

Nos casos em existem várias fases de carregamento do aterro, obtêm-se várias rectas paralelas entre si, correspondendo a cada fase de carregamento (Figura 24).

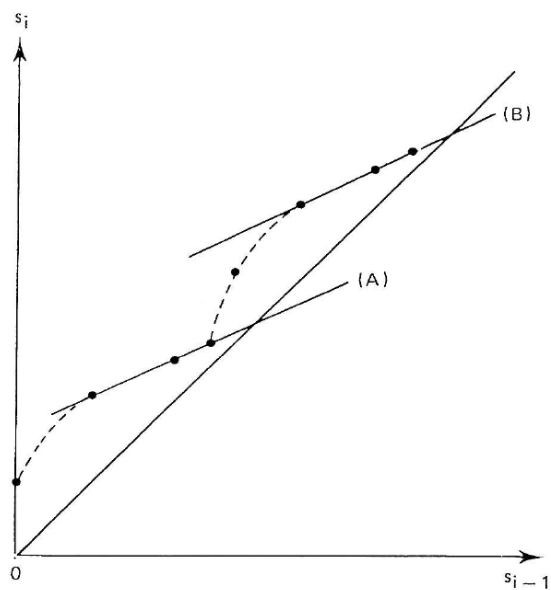


Figura 24: Construção de Asaoka no caso de carregamento por etapas (Magnan e Deroy, 1980).

A Figura 25 ilustra um caso de várias fases de carregamento em que apenas a consolidação primária é mobilizada e no final dá-se a consolidação secundária.

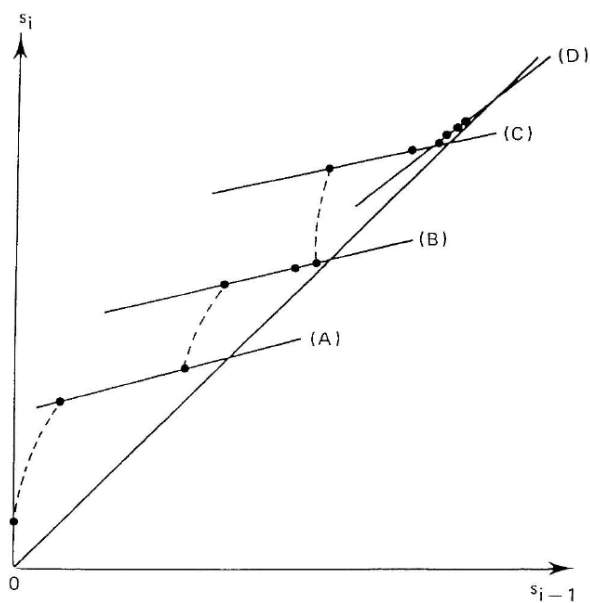


Figura 25: Construção de Asaoka no caso de carregamento por etapas, com consolidação secundária apenas no final a última fase de carregamento (Magnan e Deroy, 1980).

Em outros casos em que o tempo entre fases de carregamento é relativamente elevado, pode observar-se a consolidação secundária no final de cada fase de carregamento preliminar, conforme ilustrado no gráfico da Figura 26.

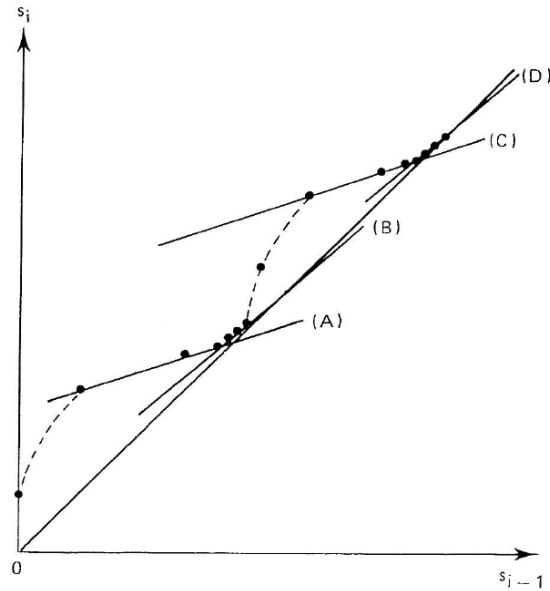


Figura 26: Construção de Asaoka no caso de carregamento por fases com consolidação em cada fase (Magnan e Deroy, 1980).

Conforme já referido acima, as pendentes das rectas (A), β_1 , obtidas a partir da construção de Asaoka, estão relacionadas com os coeficientes de consolidação, neste caso primário (para drenagem exclusivamente vertical), e segundo Asaoka, a partir da equação:

$$C_v = -\frac{5}{12} H^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad \text{Eq. 4-30}$$

Em que H é a distância máxima de drenagem da(s) camada(s) compressível (is).

Considerando drenagem exclusivamente radial – através de drenos verticais, teríamos:

$$C_h = -\frac{D^2}{8} F_n \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad \text{Eq. 4-31}$$

Em que D representa o diâmetro da zona de influência dos drenos (igual a 1,05 s para malhas triangulares e 1,13 s, para malhas quadradas, sendo s o espaçamento entre drenos e:

$$F_n = -\frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad \text{Eq. 4-32}$$

Sendo $n = D/d$ e d o diâmetro do dreno.

No caso de fluência a determinação de um coeficiente adaptado da consolidação secundária “ λ ”, é formulado por Asaoka da forma abaixo descrita:

$$\lambda = -\frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad \text{Eq. 4-33}$$

Sendo integrante de uma expressão que permite o cálculo dos assentamentos por fluência:

$$S_{(t)} = S_{\infty} (1 - \exp(-\lambda t)) \quad \text{Eq. 4-34}$$

Nota: λ não é relacionável com C_{α} , o clássico parâmetro designado de “coeficiente de consolidação secundária”.

Assim, para cada fase de carregamento do aterro pode-se determinar um valor para o assentamento final e um valor do parâmetro que controla a velocidade de deformação (C_v ou Ch , conforme os casos).

Os dados obtidos com este tipo de análise, também poderão ser utilizados para calibrar modelos numéricos de cálculo, por exemplo modelos de elementos finitos, permitindo melhorar a previsão de resultados face a diferentes situações de carregamento e/ou tratamento de solos.

CAPÍTULO 5

ASPECTOS CONSTRUTIVOS E DE CONTROLE DE QUALIDADE

5 Aspectos construtivos e de controle de qualidade

É recomendável a verificação da realização dos objectivos pretendidos com o tratamento. Para tal devem ser indicados, antes do início dos trabalhos, os métodos mais adequados e os resultados esperados, para a sua verificação.

O tipo de testes e a frequência de execução para o cumprimento dos requisitos do controle de qualidade deverão ser explicitados no projecto de execução. A execução e interpretação de ensaios de campo e laboratoriais deverá atender às especificações constantes nas normas ENV 1997-2 and ENV 1997-3. Os testes, embora necessários, podem não ser suficientes para determinar a eficiência do tratamento, devendo ser preparada um plano de supervisão e monitorização. Muitas vezes uma abordagem pelo método observacional representa a forma mais adequada de encarar os problemas que surjam durante a execução da obra, estando o projecto terminado apenas após a conclusão de todos os trabalhos e após a verificação final dos resultados.

5.1 Controle de Qualidade do processo de Execução

De um modo geral, quando o projecto prevê a realização de plataformas de trabalho, estas correspondem à primeira fase dos trabalhos. As plataformas de trabalho podem cumular funções de camada drenante ou de distribuição de cargas e deverão ser sempre projectadas, executadas e mantidas de forma a garantir a execução dos trabalhos e a mobilidade do equipamento em condições de segurança. Os materiais utilizados na construção das plataformas de trabalho devem ser adequados à função a que se destinam, não devendo no entanto constituir um obstáculo à penetração do vibrador.

No que diz respeito à execução das colunas de brita a melhor forma de proceder ao controle de qualidade é dispor de um sistema computadorizado de forma a obter uma visualização e um registo *on line* dos principais parâmetros de execução. O registo dos parâmetros de execução deverá ser efectuado individualmente para cada coluna executada, permitindo um controle apertado da qualidade dos trabalhos executados.

Normalmente a aparelhagem de medição e registo instalada na máquina de execução de colunas de brita compõe-se de:

- um painel de comando na cabine do operador;
- uma unidade central para o registo dos dados;
- um computador com impressora.

Sendo os parâmetros registados automaticamente por este sistema os seguintes:

- hora;
- profundidade;
- velocidade de avanço;
- força vertical exercida sobre o vibrador;
- intensidade da corrente eléctrica absorvida pelo vibrador (quando o vibrador é eléctrico).

Cada ponto tratado deverá ser identificado com um número de referência sendo as suas coordenadas referenciadas aos pontos, ou eixos, de referência da obra. Aquando da implantação dos pontos em planta considera-se como sendo aceitável um desvio horizontal de até 150 mm. A profundidade atingida pelo vibrador deverá ser adicionalmente controlada externamente por intermédio de uma escala inscrita no corpo do vibrador e nas extensões a ele acopladas. As colunas de brita devem ser construídas o mais verticalmente possível. O vibrador não deverá sofrer desvios com a vertical superiores a 1/20.

A compactação da brita é controlada por intermédio da intensidade de corrente eléctrica (no caso dos vibradores eléctricos) necessária para produzir a vibração. Desta forma, assim que é atingido o aumento previsto para essa intensidade durante a compactação, eleva-se o vibrador e inicia-se outro estágio de compactação. Este processo é controlado por leitura directa de um amperímetro e é ainda regularmente registado automaticamente por um computador ligado a este amperímetro (Figura 27).

O controlo do diâmetro médio de cada coluna de brita é aferido por intermédio da quantidade de brita consumida em cada furo. Esta quantidade é controlada pelo operador da máquina que deverá anotar o n.º de baldes de brita (baldes da retroescavadora previamente cubitados) consumidos em cada coluna executada e/ou adicionalmente registado pelo sistema automático de registo.

Todos os dados deverão ser anotados em impresso próprio, sendo elaborados registos diários, executados por cada equipamento.

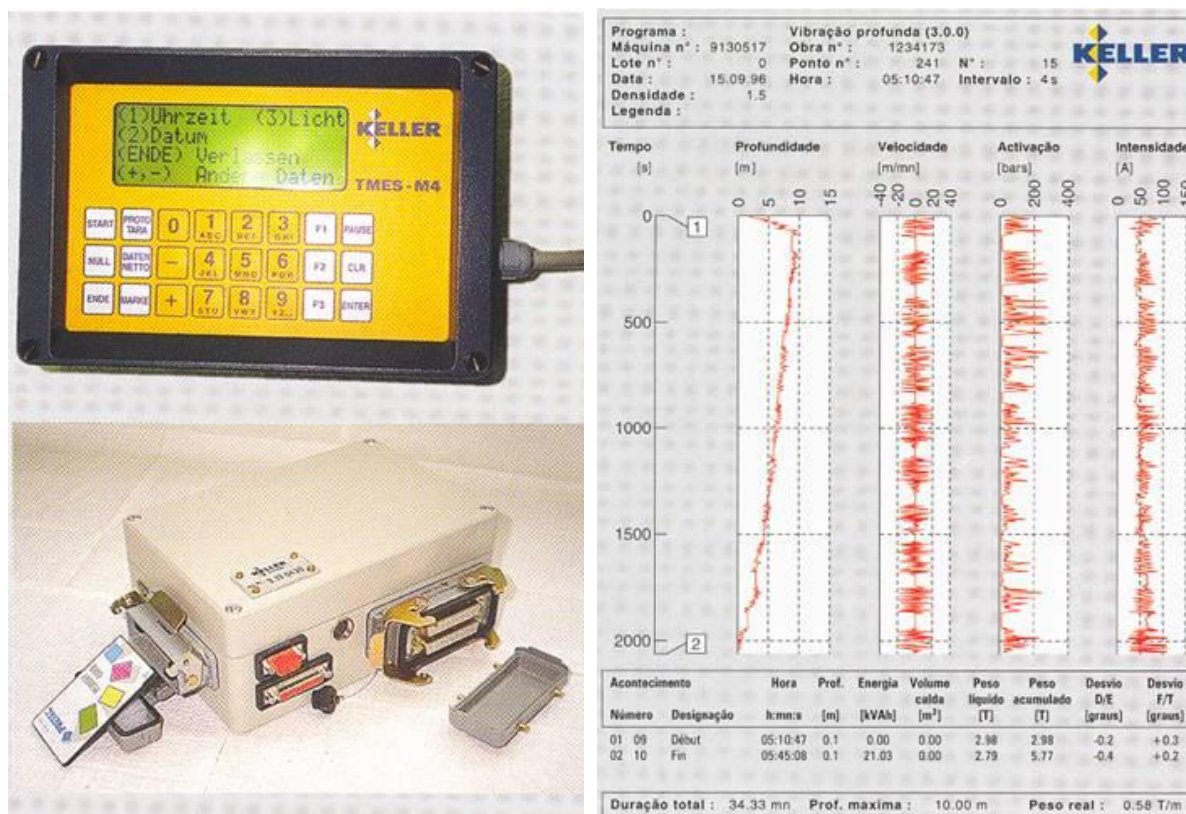


Figura 27: Sistema Computorizado (M4), utilizado pela Keller, para visualização e registo contínuo dos parâmetros de execução e *Layout* do registo individual dos parâmetros de execução de cada coluna de brita

Para efectuar o controlo de assentamentos causados pelo tratamento, podem ser utilizadas marcas topográficas. No caso de obras como aterros para vias de comunicação é corrente serem instalados inclinómetros para medição de deformações laterais (o não confinamento na direcção transversal implica deformações bidimensionais); Nos tratamentos para estabilização de taludes, devem ser instalados piezómetros interceptando as potenciais superfícies de deslizamento. Poderão ser instaladas células de carga com o objectivo de controlar a carga que será redistribuída para cada coluna de brita.

Os procedimentos para efectuar o controle de qualidade deverão ser estabelecidos no que diz respeito à verificação e monitorização. A fiscalização dos trabalhos deverá ser

efectuado por pessoal qualificado e com experiência na área de acordo com a cláusula 4 da norma ENV 1997-1.

Na obra deverá encontrar-se disponível um plano de controlo de qualidade no qual deverão constar os seguintes elementos:

- procedimentos escritos, incluindo uma lista dos parâmetros de controlo mais importantes;
- condições da obra e dos solos existentes, com base nos elementos do projecto base;
- quaisquer obstruções no solo que dificultem ou impeçam a penetração no solo do vibrador.
- Qualquer alteração ao projecto provocado por quaisquer condições não previstas inicialmente ou devidas a qualquer nova informação geotécnica complementar deverá ser avaliada e acordada entre as partes intervenientes.
- Os parâmetros de controlo essenciais devem ser monitorizados e registados durante a execução dos trabalhos. Deverá ser utilizado um sistema de registo em contínuo.
- Variações significativas no consumo de brita em colunas com o mesmo comprimento, devem ser registadas e os seus efeitos no projecto devem ser avaliadas.
- Quaisquer alterações no abastecimento dos materiais deve ser registado e os seus eventuais efeitos no projecto avaliados.

5.2 Qualidade dos Agregados a utilizar

Os materiais a utilizar deverão ser de qualidade e de granulometria controladas e o mais homogêneos possível. Normalmente, são utilizados agregados de rocha calcária ou granítica, ou seixos rolados britados. Não deverão ser aplicados materiais reciclados, excepto se estiverem bem caracterizados, nomeadamente através de ensaios específicos que demonstrem a ausência de respostas anómalas quer a curto quer a longo prazo, como poluição ou reacções físico-químicas que alterem as características geomecânicas consideradas no dimensionamento.

As características que os agregados a utilizar na execução de colunas de brita devem apresentar são, de acordo com a norma francesa NFP11-212, os seguintes:

- Ensaio de Los Angeles (LA) de acordo com a norma francesa NFP 18573

$$LA < 35$$

- Ensaio Micro Deval (MDE), de acordo com a norma francesa NF P 18572

$$MDE < 30$$

$$LA + MDE < 60.$$

Os vibradores com alimentação pelo fundo do furo são mais sensíveis à variação de granulometria dos agregados utilizados, uma vez que uma granulometria mal escolhida pode provocar rolhões no tubo, impedindo a correcta execução dos trabalhos.

De acordo com a EN 14731 de Setembro de 2005, os agregados utilizados para a execução das colunas de brita deverão ser suficientemente duros e inertes de forma a que se mantenham estáveis durante a execução da coluna e durante o tempo de serviço do maciço tratado, dentro das condições de terreno previstas (solo e nível freático). Os testes necessários poderão ser executados, por exemplo de acordo com os procedimentos definidos na EN 1097, para testar as propriedades mecânicas e físicas dos agregados.

O fuso granulométrico dos agregados poderá ser determinado de acordo com a norma ENV 1997-2.

Na EN 14731 refere-se que a granulometria deverá ser a apropriada para permitir uma boa compactação e a execução de uma coluna perfeitamente embricada com o solo envolvente e que respeite ainda outras eventuais exigências como a drenagem. Ainda na EN 14731 faz-se também referência aos seguintes valores indicativos para as granulometrias a utilizar nos diferentes sistemas:

- Vibrador com tubo lateral, para alimentação da brita à “boca” do vibrador (normalmente trata-se do sistema a seco): o fuso granulométrico mais utilizado é o 8/50 mm; Em Portugal é usual utilizar brita 2 ou 3 com fusos 15/25 a 15/32.
- Outras técnicas (normalmente trata-se do sistema a húmido): o fuso granulométrico mais utilizado é o 25/75 de acordo com a EN 14731.

A norma francesa NFP 18591, indica que os agregados a utilizar deverão apresentar uma percentagem de material com fracção inferior a 80µm menor que 5 %.

5.3 *Controle de Qualidade Após a Execução*

O principal objectivo dos testes consiste em avaliar o desempenho do tratamento previsto. No caso das colunas de brita poderão ser executados alguns testes adicionais para controlo de qualidade.

Na selecção do tipo de testes a adoptar deve pesar o objectivo do melhoramento de solos.

Os testes seleccionados deverão seguir sempre que possível as normas internacionais tais como a ENV 1997-2 e ENV1997-3. Os parâmetros a monitorizar, a localização das colunas de teste, a frequência dos testes e critérios de aceitação dos mesmos deverão ser definidos antes do início da obra. Os testes devem ter em consideração a quantidade de solo tratado, a variabilidade dos solos interessados, o tipo de fundações, a degradação de cargas em profundidade, e quaisquer outros aspectos que possam ser relevantes para o resultado final.

Quando as colunas de brita são instaladas em solos granulares podem ser aplicáveis os seguintes testes:

- a) Cone Penetration Tests (CPT e CPTU) que fornecem um registo contínuo da resistência de ponta, do atrito lateral e no caso do CPTU, das pressões neutras;
- b) Testes com dilatómetro (DMT) que fornecem o módulo de deformabilidade;
- c) Ensaio dinâmico (DP) que fornecem um registo da resistência à penetração.
- d) Testes com pressiómetro (PMT) que fornecem o módulo de deformabilidade;
- e) Standard Penetration Tests (SPT) que fornecem a resistência à penetração.

Os parâmetros obtidos com os testes atrás enunciados podem ser correlacionados empiricamente com os parâmetros geomecânicos que controlam o comportamento da massa de solo, no entanto a comparação destes ensaios antes e após o tratamento, não reflectem necessariamente o melhoramento obtido na massa de solo tratado.

Outra forma de testar o resultado do melhoramento obtido consiste na execução de ensaios de carga, desde que executados a uma escala correcta e durante um período de tempo adequado, podem fornecer dados fiáveis sobre os parâmetros geomecânicos que controlam o comportamento da massa de solo.

Ensaio de carga de grande escala incluem grandes ensaios de placa e carregamentos protótipo em grandes áreas. Estes ensaios devem ser efectuados através do carregamento de uma placa de aço rígida ou uma laje de betão rígida com área suficiente para abranger uma ou duas colunas de brita e o solo envolvente às mesmas. Os ensaios de placa executados sobre colunas de brita individuais, devem ser executados colocando a placa concentricamente em colunas individuais, carregadas com incrementos, por patamares, sendo os assentamentos da placa medidos a partir de uma referência estável.



Figura 28: Ensaio de carga, recorrendo a perfis metálicos e ancoragens verticais ao terreno para garantir a reacção necessária à execução do ensaio.



Figura 29: Ensaio de carga, recorrendo a blocos de betão para mobilizar a reacção necessária à execução do ensaio.



Figura 30: Execução de ensaio de placa, utilizando a sonda como elemento de mobilização da reacção.

Os testes em protótipos, mais representativos que os anteriores, devem ser executados através do carregamento de uma grande área de solo tratado, normalmente através da construção e carregamento de uma fundação à escala real, ou, de forma a simular as cargas distribuídas através da construção de um aterro sobre a zona a testar.

Normalmente os ensaios de carga são efectuados com cargas entre 100 a 150 % da carga de projecto. Existem diversas formas de executar os ensaios de carga, algumas das diferentes possibilidades de mobilização da reacção são ilustradas nas fotografias apresentadas na Figura 29 e na Figura 30.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÃO DE MODELOS DE CÁLCULO DE DIMENSIONAMENTO E CONFRONTO COM RESULTADOS OBSERVADOS EM OBRA

6 Aplicação de Modelos de Cálculo de Dimensionamento e Confronto com Resultados Observados em Obra

Neste capítulo apresenta-se um exemplo de aplicação desenvolvido pelo autor, de um conjunto de métodos de dimensionamento e análise de assentamentos observados em uma obra em que foram conjugados um aterro de pré-carga e o melhoramento de solos com colunas de brita em solos moles da Bacia do Tejo (solos aluvionares lodosos e arenosos) com espessuras entre 16 e 25 m. A análise e tratamento dos assentamentos observados no tempo permitiu estimar/aferir o assentamento total esperado quer em termos de consolidação primária quer em termos de consolidação secundária.

Para a execução desta análise foram conjugadas várias técnicas, desde o Método Observacional proposto por Asaoka (1978), passando pelo cálculo dos assentamentos pelo método de Priebe utilizando o *software* Greta, pelo método de elementos finitos com o *software* Plaxis aplicando o modelo de Mohr Coulomb e o modelo Soft Soil Creep.

Ainda no âmbito deste trabalho foram recolhidas amostras indeformadas tendo sido executados ensaios edométricos de longa duração com o objectivo de obter parâmetros geomecânicos para aplicação do modelo Soft Soil Creep.

A conjugação do aterro de pré-carga com tratamento do solo com colunas de brita teve por objectivo aumentar a capacidade de carga do solo e simultaneamente acelerar a consolidação esperada, evitando assim eventuais problemas futuros com assentamentos excessivos. A análise conjugada acima descrita, além de permitir verificar/aferir os parâmetros do modelo de cálculo e estimar os assentamentos totais esperados, permitirá ainda, quando for o caso ajudar à decisão de quando retirar o aterro de pré-carga e prosseguir com a obra, que nem sempre se revela uma decisão fácil em casos de solos com elevada compressibilidade.

6.1 Enquadramento Geológico

Na zona em questão encontram-se espessas formações aluvionares Modernas do Holocénico e Terraços do Plio-Plistocénico assentes sobre as formações Miocénicas que formam o substrato (Carta Geológica de Portugal à escala 1/50.000, Folha 30 – D).

As aluviões modernas constituem um complexo fluvio-marinho composto fundamentalmente por uma alternância de lodos e areias mais ou menos lodosas. Estas formações são caracterizadas por uma estrutura lenticular com grande irregularidade e complexidade de estratificação.

Subjacente às aluviões modernas, encontram-se os depósitos de Terraços do Plio-Plistocénico da margem direita do Baixo Tejo, que são caracterizados pela ocorrência intercalada de níveis argilosos, níveis arenosos e níveis de seixos e cascalheiras. Conforme referido na nota explicativa da Carta Geológica, estes depósitos são pouco desenvolvidos e geralmente muito recortados pela erosão.

As Aluviões da planície de cheia do Rio Tejo estendem-se entre Vila Nova da Rainha, Carregado, Castanheira do Ribatejo e Vila Franca de Xira.

6.2 Prospecção Geotécnica

A definição dos parâmetros geométricos e geotécnicos do modelo de cálculo foi efectuada a partir de dados obtidos por prospecção geotécnica *in situ* e por resultados obtidos a partir de ensaios laboratoriais, conforme descrito abaixo:

Prospecção in situ

- 3 ensaios CPT (Cone Penetration Test) (dois deles com ensaios de dissipação);
- 3 sondagens a trado com execução de ensaios SPT tendo sido recolhidas amostras indeformadas para execução de ensaios laboratoriais,

Ensaio Laboratoriais:

- Ensaio edométrico;
- Ensaio de identificação e determinação de índices físicos;
- Determinação dos teores em matéria orgânica.

Foram obtidos teores em matéria orgânica da ordem dos 4%.

No Quadro 4 abaixo são resumidos os valores dos índices físicos dos solos ensaiados.

Quadro 4: limites de Atterberg, densidade e baridades obtidas nas amostras S3, S6, 4833, 4834 e 4837 e SB2010.

Ref. ^a (Amostras)	Profundidade (m)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)	Teor em Água (%)	Densidade das partículas	Peso Volúmico do solo seco (kN/m ³)	Peso volúmico do solo (kN/m ³)
S3	6 a 6,6	53	30	77	2,66	8,78	15,5
SB2010	9 a 9,6	62	36	69	2,71	9,24	15,62
4833	11 a 11,6	64	34	64	-	-	-
4834	13 a 13,6	62	31	63	-	-	-
S6	15 a 15,6	60	33	52	2,65	11,62	17,60
4837	19 a 19,6	58	28	59	-	-	-

No Quadro 5 e no Quadro 6, abaixo resumem-se os resultados de dois dos ensaios edométricos executados.

Quadro 5: Resumo dos resultados do ensaio edométrico da amostra S6

Ref. ^a S3 - 6 a 6,6 m de prof.				
Patamar Carga (MPa)	C_v (cm ² /s)	a_v (Mpa ⁻¹)	m_v (Mpa ⁻¹)	E_0 (MPa)
0,0125	2,49E-04	9,229	3,033	0,33
0,0310	2,94E-04	6,353	2,088	0,479
0,0630	3,78E-04	3,863	1,27	0,788
0,1250	3,08E-04	2,381	0,783	1,278
0,2500	4,15E-04	1,459	0,48	2,085
0,5000	4,77E-04	0,735	0,242	4,138
Cc=0,611				
Cr= 0,110				

Quadro 6: Resumo dos resultados do ensaio edométrico da amostra S6

Ref. ^a S6 - 15 a 15,6 m de prof.				
Patamar Carga (MPa)	C_v (cm ² /s)	a_v (Mpa ⁻¹)	m_v (Mpa-1)	E_0 (MPa)
0,0125	2,09E-04	1,159	0,507	1,972
0,0310	2,23E-04	0,923	0,404	2,474
0,0630	3,14E-04	1,274	0,558	1,794
0,1250	2,09E-04	0,972	0,425	2,351
0,2500	2,01E-04	0,739	0,323	3,092
0,5000	1,86E-04	0,459	0,201	4,979
Cc = 0,381				
Cr = 0,101				

No Quadro 7 apresentam-se os resultados dos ensaios *in situ*, de dissipação de pressões intersticiais com o CPTu.

Quadro 7: Resultados dos ensaios de dissipação com CPTu

Ensaio de Dissipação de Pressões Neutras CPTu		
Ref. ^a	Profundidade (m)	Ch (cm ² /min)
CPTuK3	6,22	1,31x 10 ⁻²
CPTuK3	12,06	1,78 x 10 ⁻²
CPTuK4	9,20	5,4 x 10 ⁻²
CPTuK4	14,05	1,55x 10 ⁻²

Nas zonas lodosas a cinzento claro da Figura 32 (ZG2A - entre as cotas 0 a -14 na zona mais desfavorável) as varas do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) afundam-se com o peso próprio e a resistência de ponta do CPT (*Cone Penetration Test*) $q_c < 0,5$ MPa.



Figura 31: Legenda dos cortes geotécnicos apresentados abaixo.

Ainda relativamente aos lodos cinzentos ZG2A, tendo em conta a experiência acumulada na zona em estudo existem valores de resistência ao corte não drenada (S_u) obtida através do ensaio de molinete entre os 6 e os 20 kPa e valores de Sensibilidade (St) entre 4 e 10, indicando que estes solos são muito a extremamente sensíveis o que pode levar a fenómenos de rotura progressiva (Fernandes, M., 2006), devendo-se ter este facto em atenção na selecção dos coeficientes de segurança.

Pela classificação unificada estes lodos cinzentos inserem-se nos grupos MH- Silte Elástico e CH-Argila Gorda.

O nível freático encontra-se geralmente entre a cota 0 e a cota +1.

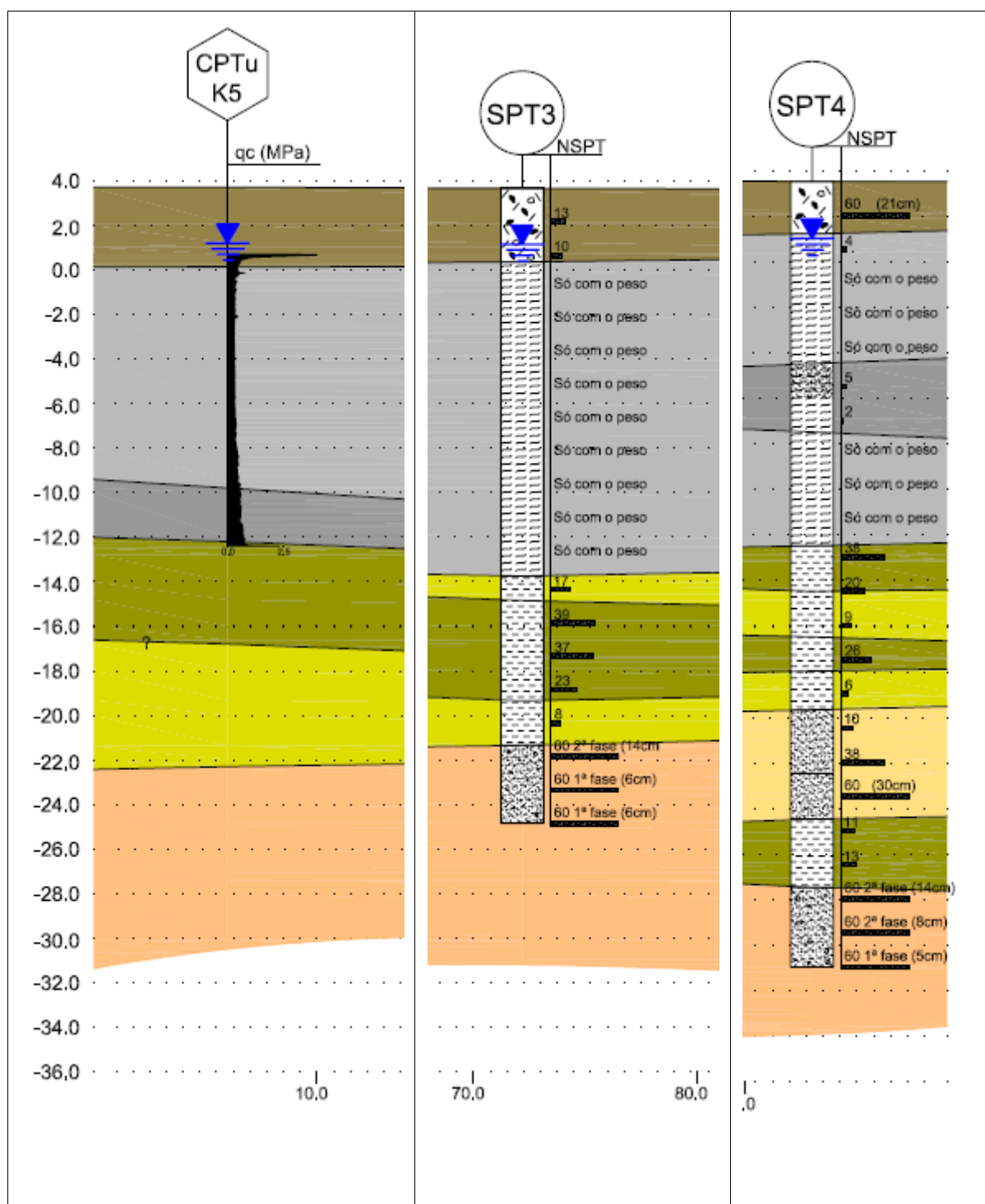


Figura 32: Cortes geotécnicos efectuados com base em sondagem com ensaio CPT e em duas sondagens com ensaios SPT executadas na zona em estudo.

6.3 Melhoria de solos com colunas de brita e pré consolidação

Com base nos elementos geotécnicos e tendo em conta as permissas do projecto, foi executado um tratamento de solos com colunas de brita com 0,95 m de diâmetro médio, com uma malha de distribuição quadrada com 2,6 m de lado (Figura 33) complementada com aterro de pré-carga com 4,5 m de altura, com o objectivo de acelerar a consolidação e de reduzir assentamentos futuros.

A zona do aterro de pré carga foi instrumentada com marcas de assentamento e piezómetros para controle da evolução da consolidação.

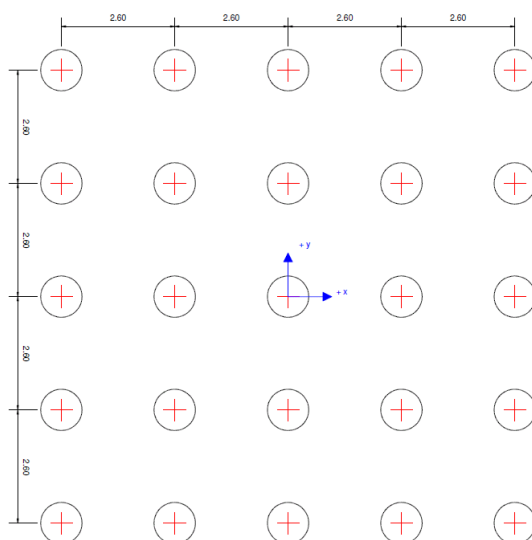


Figura 33: Implantação do tratamento por colunas de brita

Durante a fase de construção do aterro foram efectuadas campanhas de observação da instrumentação instalada com regularidade aproximadamente semanal, permitindo efectuar a análise de dados que se apresenta seguidamente.

6.4 Aplicação do Método Observacional desenvolvido por Asaoka

Foi analisada uma série de dados (ver Figura 34) de assentamento no tempo de uma marca próxima da zona mais desfavorável e aplicando o método de Asaoka, descrito em 4.2.10, considerando intervalos temporais de (Δt) de 30 e 10 dias.

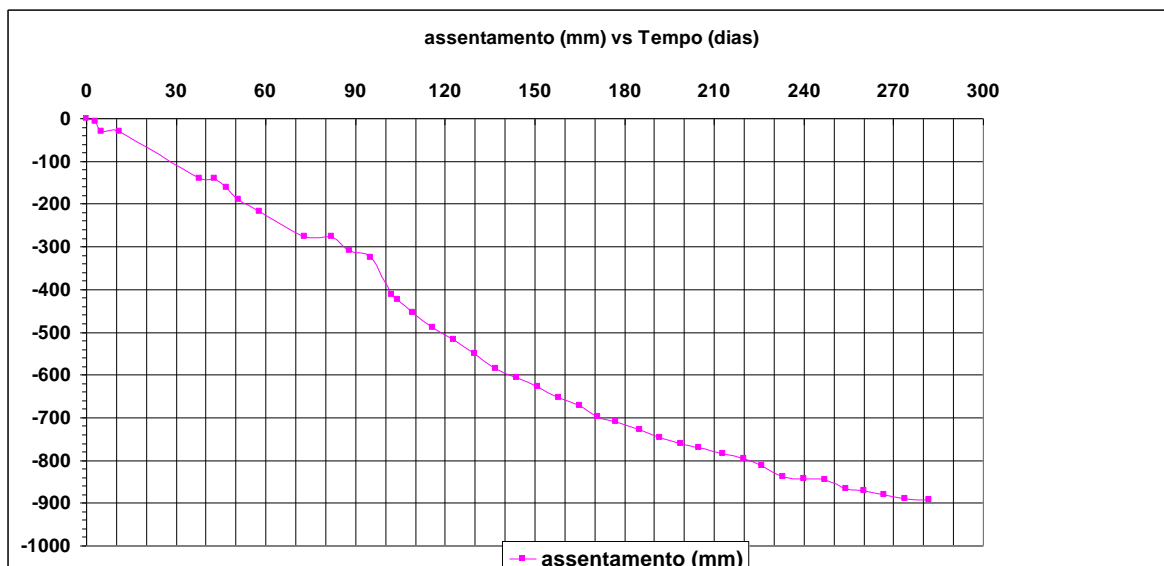


Figura 34: Assentamento registrado em uma marca ao longo de 280 dias.

O aterro só atingiu a cota máxima próximo dos 100 dias, pelo que para o ajuste linear das curvas de tendência do método gráfico proposto por Asaoka só foram considerados os valores registrados após os 100 dias (ver Figura 35).

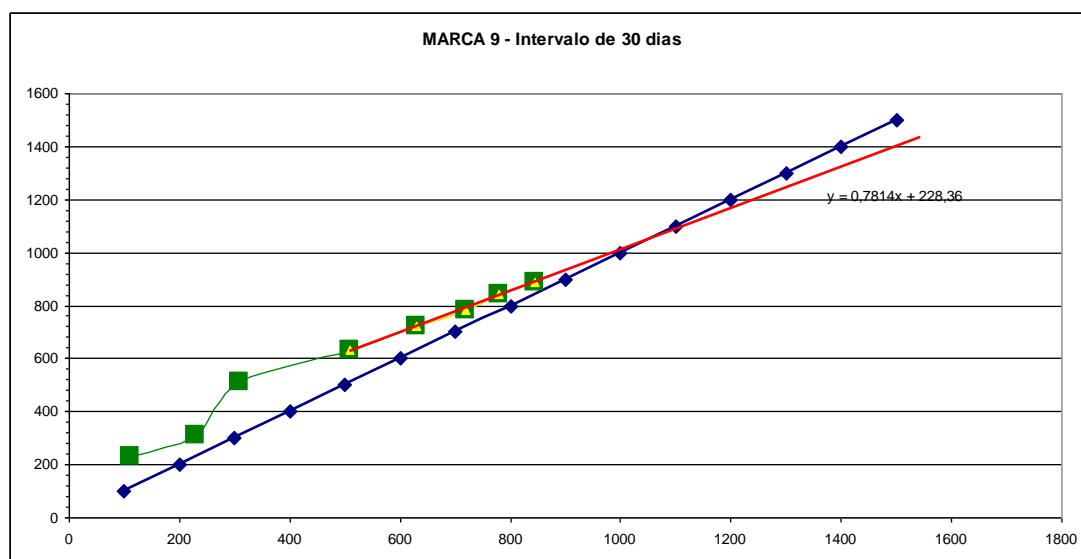


Figura 35: Aplicação do método gráfico de Asaoka com $\Delta t = 30$ dias

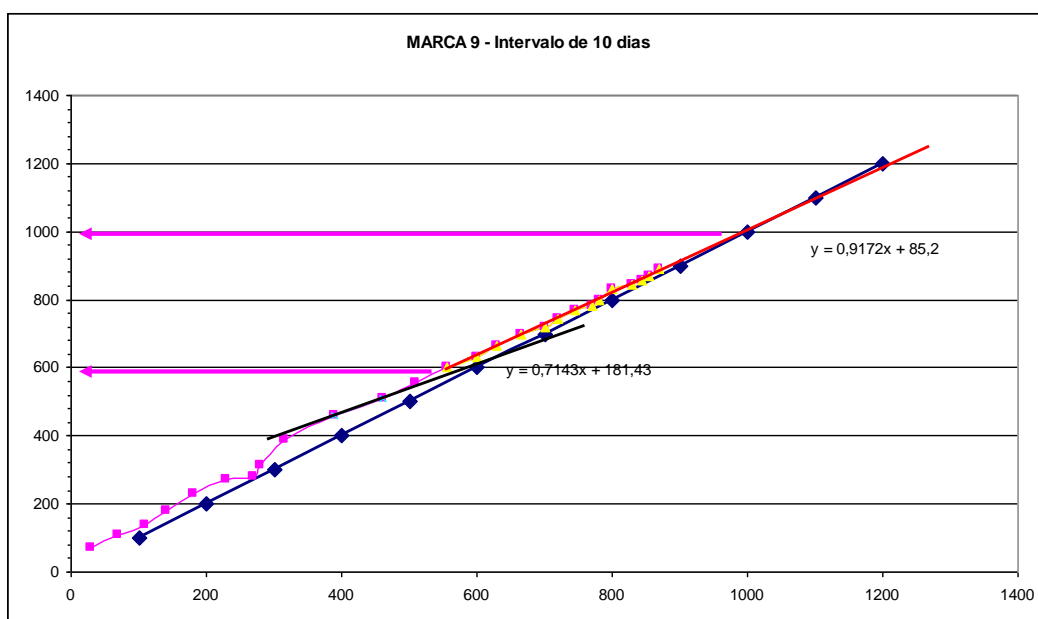


Figura 36: Aplicação do método gráfico de Asaoka com $\Delta t = 10$ dias

O método de Asaoka foi aplicado com $\Delta t = 30$ dias (Figura 35) e $\Delta t = 10$ dias (Figura 36), observando-se que com o período de tempo mais alargado não se distinguem as duas rectas, que de acordo com Magnan e Deroy (1980) representam a predominância do efeito da consolidação primária (Recta a negro) e posteriormente a predominância da consolidação secundária (Recta a vermelho). No entanto a estimativa do assentamento final é idêntica para os dois intervalos considerados. No caso do intervalo $\Delta t = 30$ dias espera-se um assentamento de 1044 mm (valor da intersecção da linha de tendência com a recta a 45°). No caso do intervalo $\Delta t = 10$ dias, o assentamento final esperado para a carga considerada na componente essencialmente de consolidação primária é de 635 mm e na componente essencialmente de consolidação secundária é de 1029 mm.

A diferença na estimativa do assentamento final relativamente aos diferentes intervalos de tempo utilizados não é significativa. No entanto a utilização de intervalos temporais mais curtos permite estimar o final da componente de assentamento que provém essencialmente da consolidação primária. Neste caso em que a consolidação primária parece ocorrer num curto espaço de tempo, para permitir a observação deste fenómeno é necessário reduzir o Δt . Claro que esta situação só é possível se os intervalos de monitorização da obra forem inferiores ou iguais ao intervalo considerado na análise.

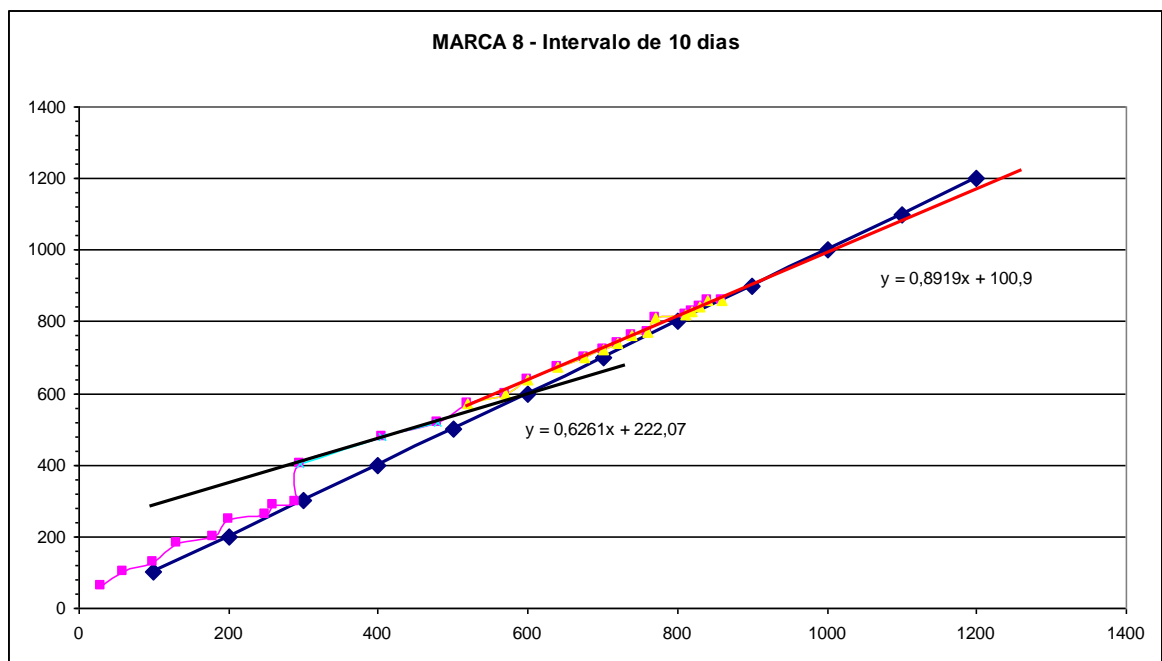
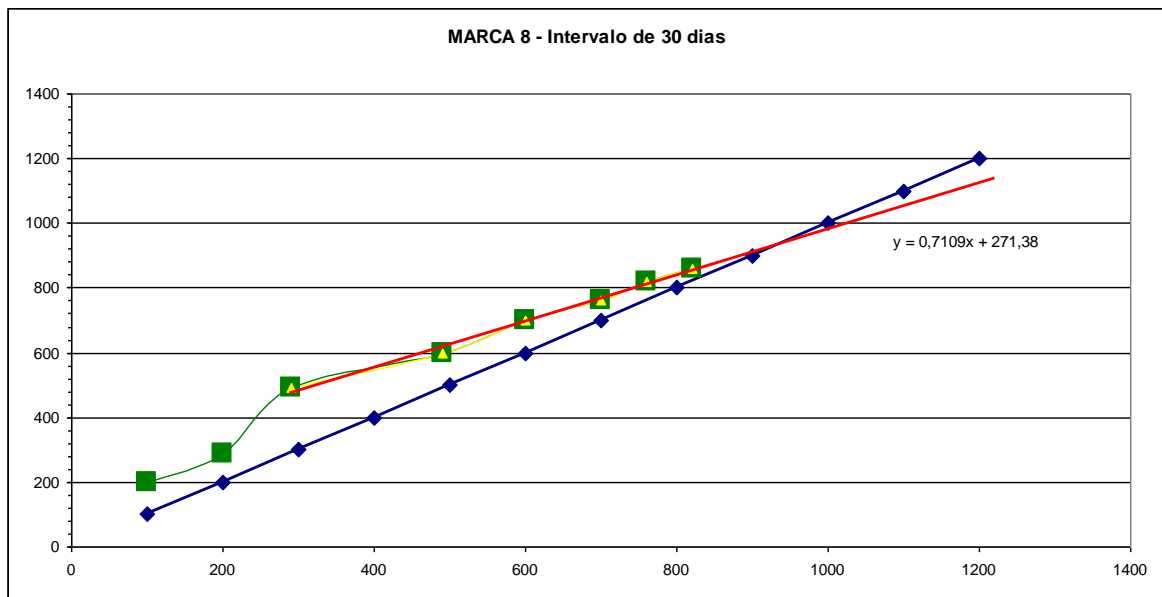


Figura 37: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

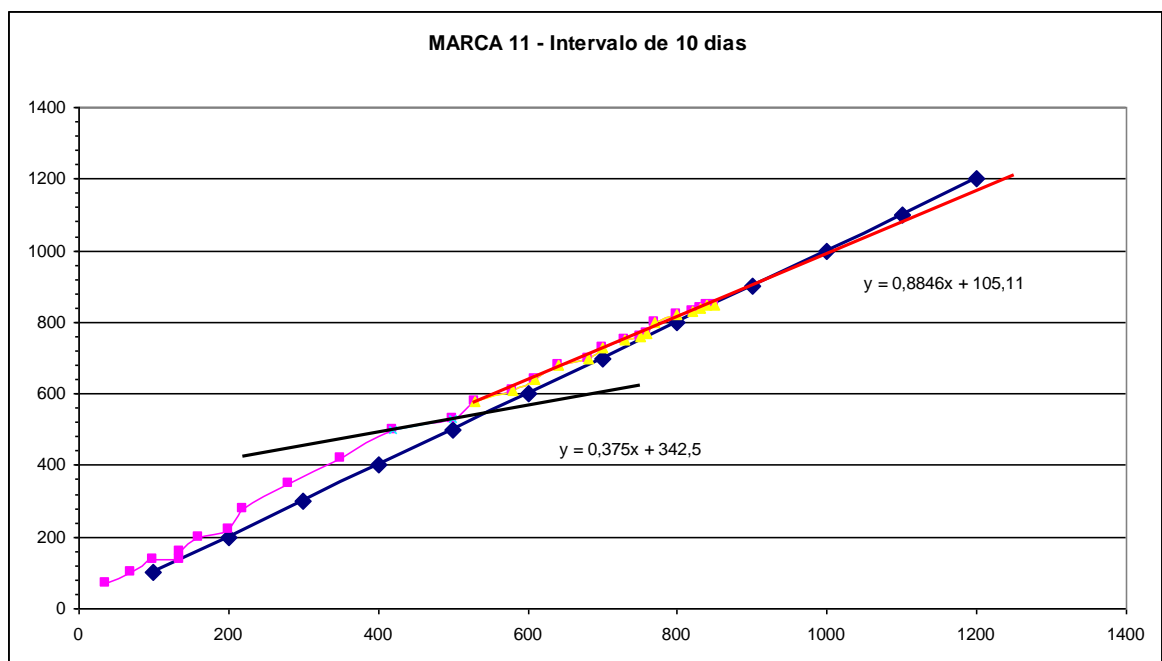
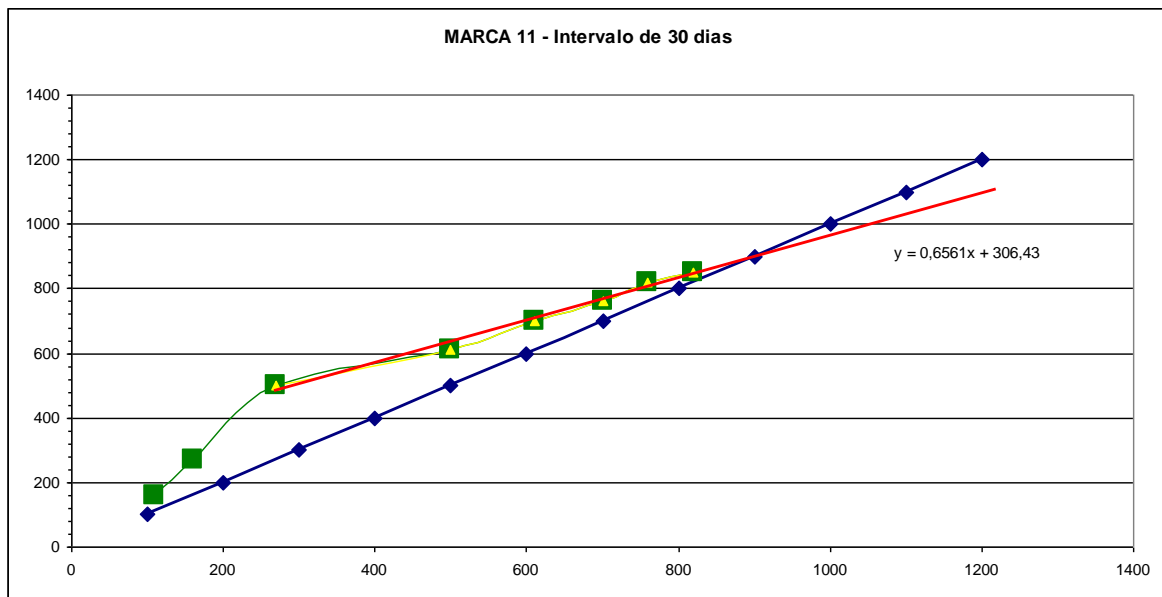


Figura 38: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

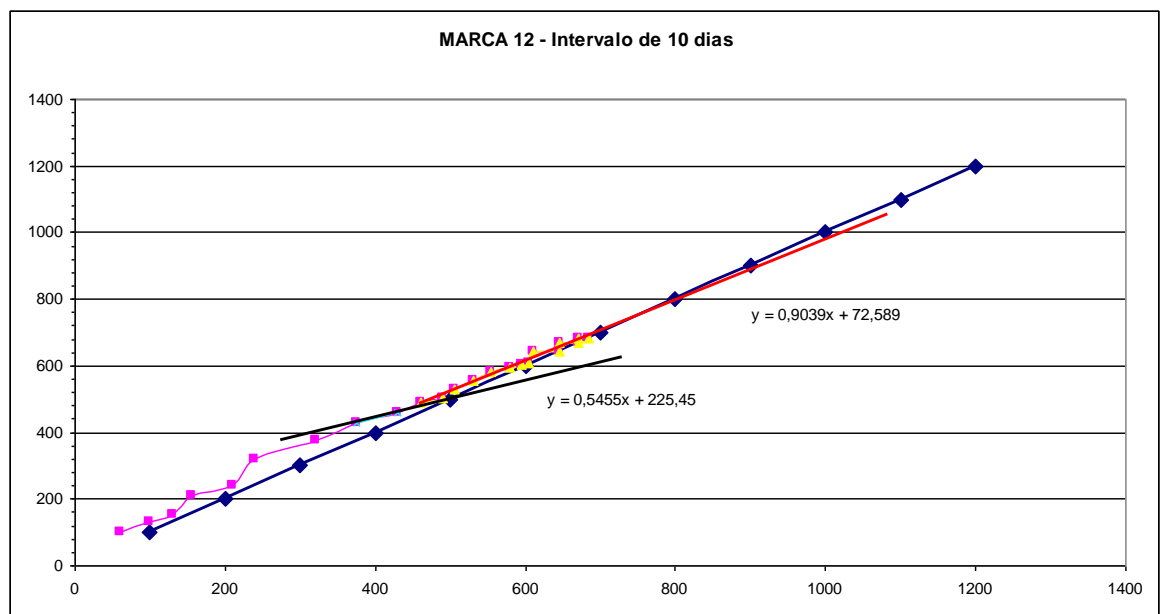
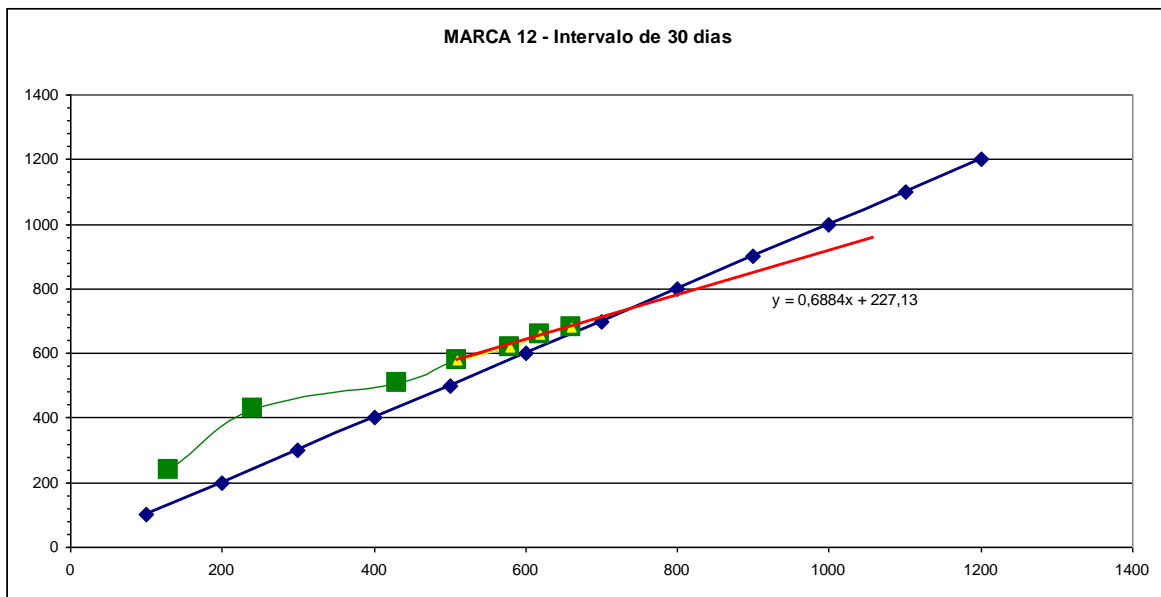


Figura 39: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

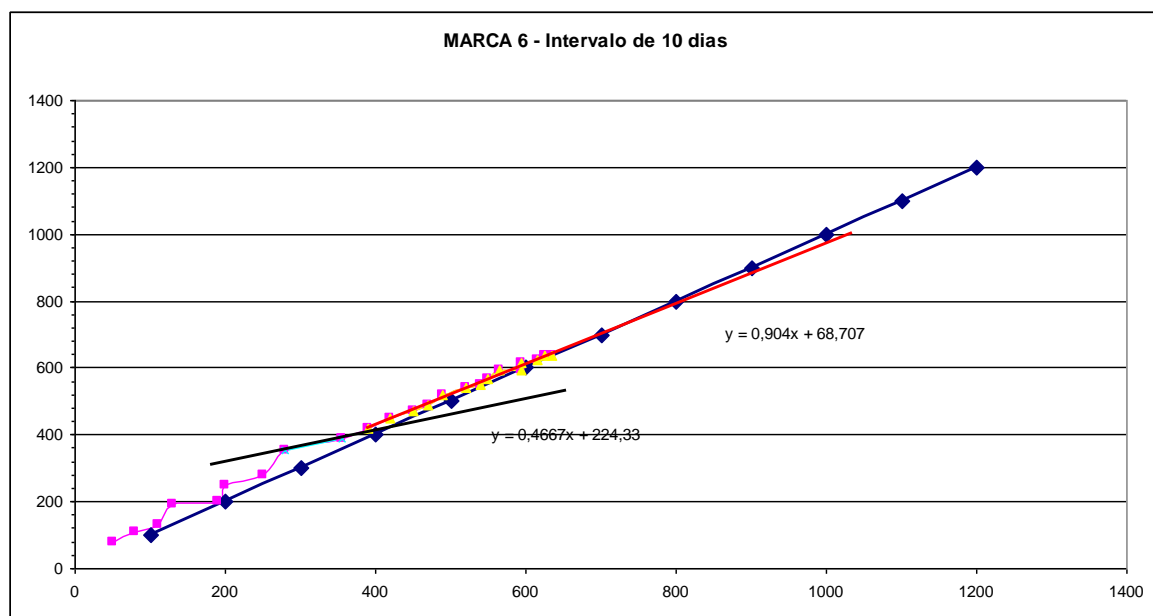
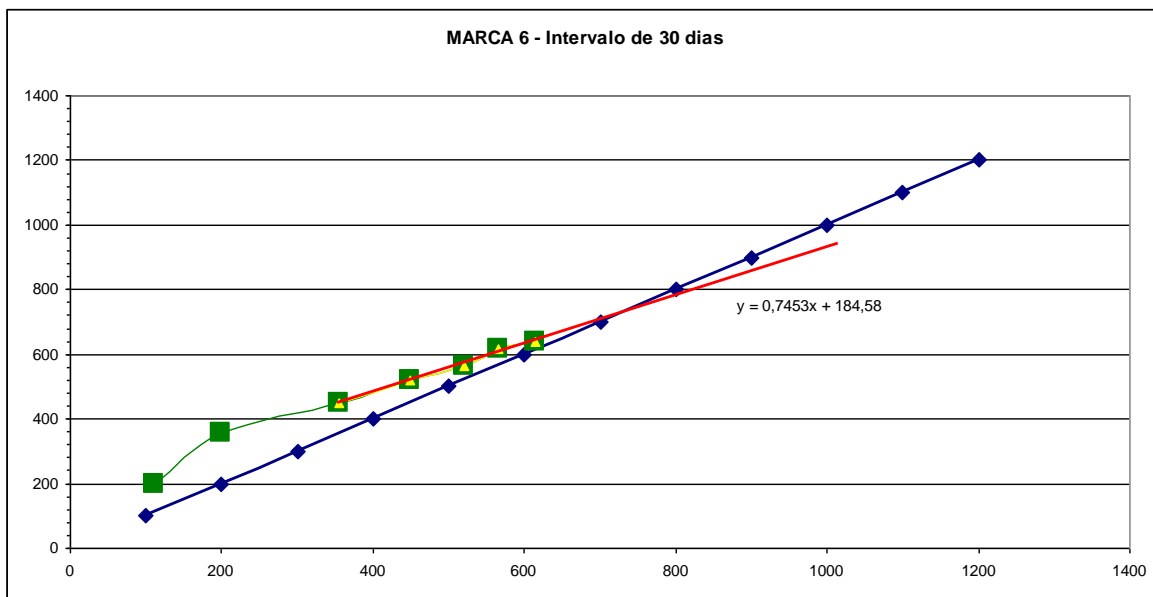


Figura 40:Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

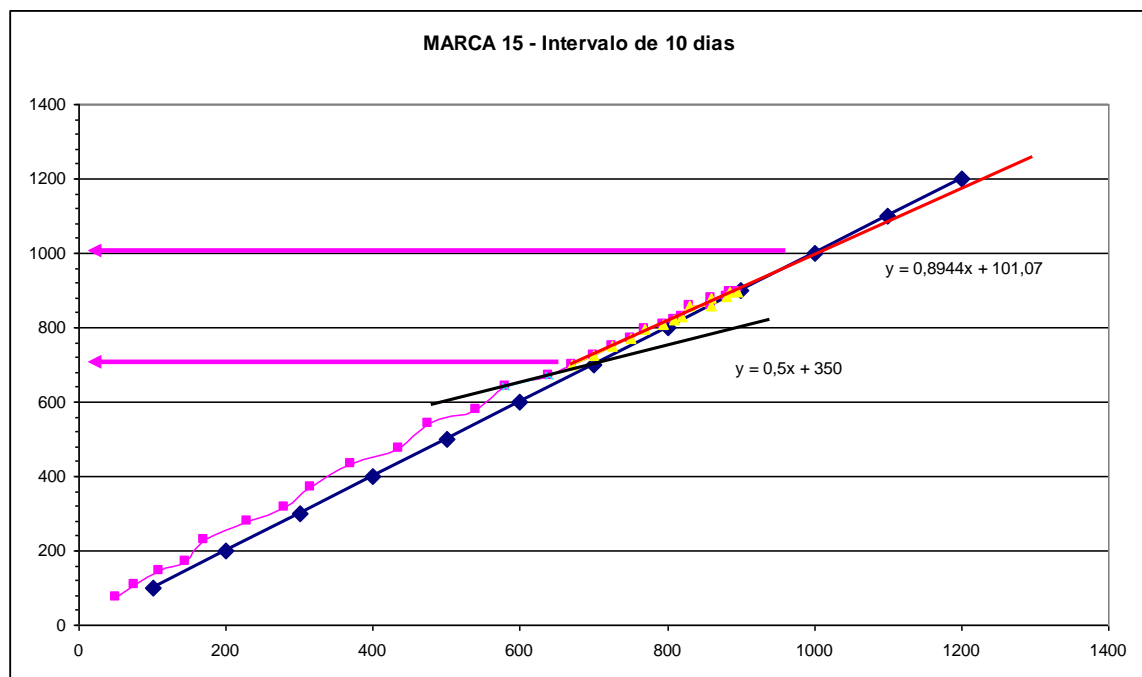
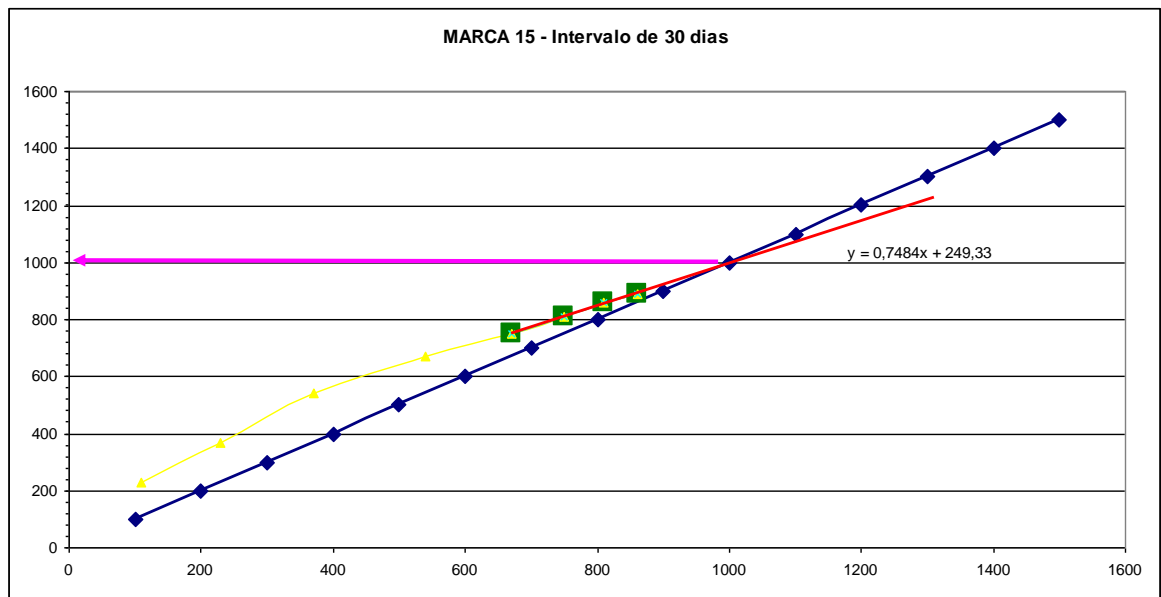


Figura 41: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

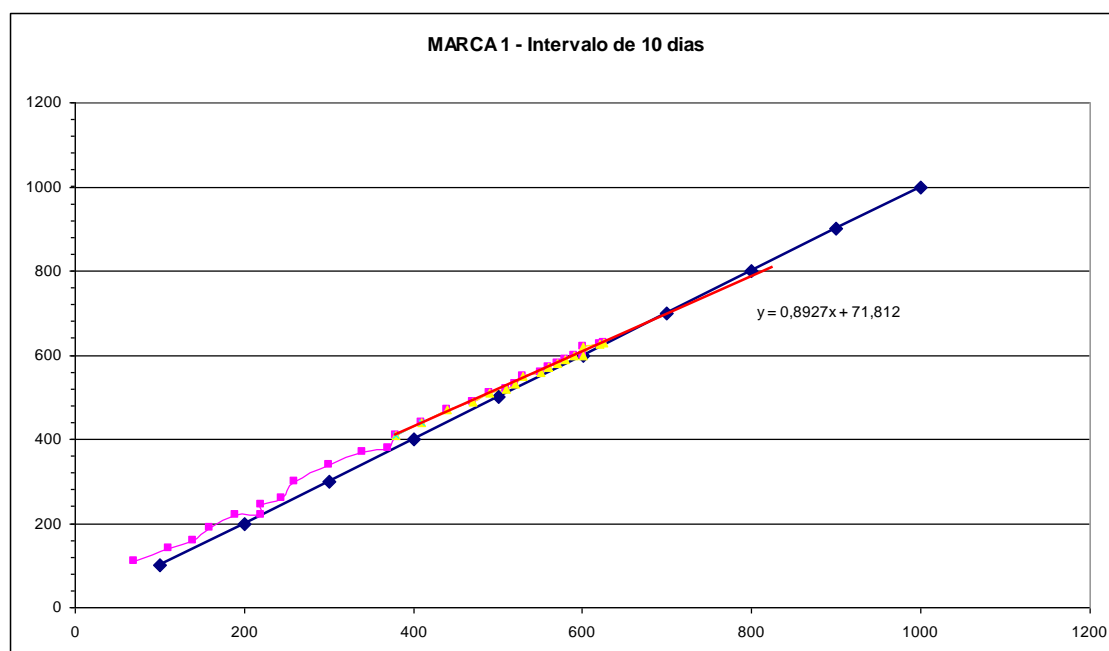
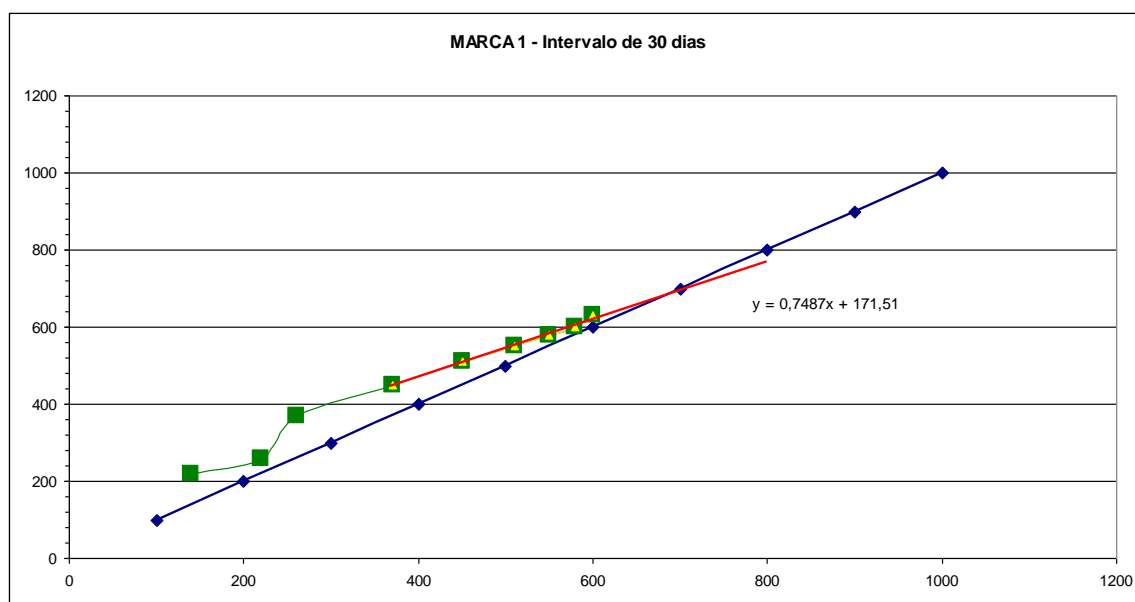


Figura 42: Aplicação do método gráfico de Asaoka a marcas de assentamento

Esta análise foi aplicada a mais algumas marcas de assentamento próximas desta tendo sido obtidos resultados idênticos aos apresentados acima (Figura 38 a Figura 42).

Das marcas de assentamento observadas, apenas na Marca 1, não foi possível distinguir a recta (Figura 42) da consolidação primária relativamente à consolidação secundária. Nesta zona a espessura de solos moles é inferior pelo que para observar o efeito observado nos restantes pontos poderia eventualmente ser necessário reduzir o intervalo temporal da

análise, uma vez que os processos de consolidação serão mais rápidos, não sendo detectados com Δt de 10 dias.

Da análise dos gráficos das Figuras 35 a 42, pode-se tentar definir o peso do fenómeno de fluência para o assentamento total (Quadro 8). Neste caso a fluência deverá contribuir com 30 a 40% do assentamento. Os valores apresentados não representam os assentamentos totais estimados para cada fase (Consolidação primária ou fluência), representam apenas os valores da intersecção das respectivas linhas de tendência com a linha de 45° de inclinação. Para a obtenção dos assentamentos totais seria necessário somar os assentamentos ocorridos até ao início dos dados considerados para a definição da linha de tendência.

Quadro 8: Análise do “peso” relativo da fluência no assentamento total

Marca	Assentamento com origem predominante de Consolidação (m)	Assentamento com origem predominante de Fluência (m)	% do assentamento total que provém da Fluência
M11	0,55	0,37	40%
M8	0,60	0,32	35%
M12	0,48	0,28	37%
M6	0,44	0,31	41%
M9	0,60	0,40	40%
M15	0,70	0,30	30%

Em solos com este comportamento em que a componente de assentamento proveniente da fluência é muito importante no resultado total e cujo cálculo/previsão pode ser problemático, a aplicação do método observacional conjugando os resultados da instrumentação instalada com as construções gráficas de Asaoka, permite aferir e controlar com mais segurança, o final da fase de pré-consolidação para remoção do aterro de pré-carga e continuar para a fase seguinte de construção.

Com o objectivo de comparar os resultados obtidos pelo método de Asaoka com outros métodos apresenta-se de seguida o resultado do cálculo para a zona da marca de assentamento n.º 9, com o método de Priebe, Cálculo por elementos finitos pelo modelo de Mohr-Coulomb e com o modelo do Soft Soil Creep Model.

Cálculo de assentamentos pelo método de Priebe

Os assentamentos totais que advêm da consolidação primária foram previstos pelo método de Priebe sem melhoramento de solos com colunas de brita foram da ordem dos 172 cm e com o melhoramento previsto da ordem de 78 cm, considerando uma tensão transmitida ao solo de fundação de 106 kN/m^2 .

O valor obtido para o assentamento por consolidação primária é significativamente superior ao valor determinado pelo método de Asaoka, 781 mm contra os 635 mm obtidos pelo método de Asaoka. De qualquer forma será sempre difícil separar a componente de assentamento proveniente de mecanismos de drenagem com a proveniente da fluência, uma vez que estes dois fenómenos interpenetram-se.

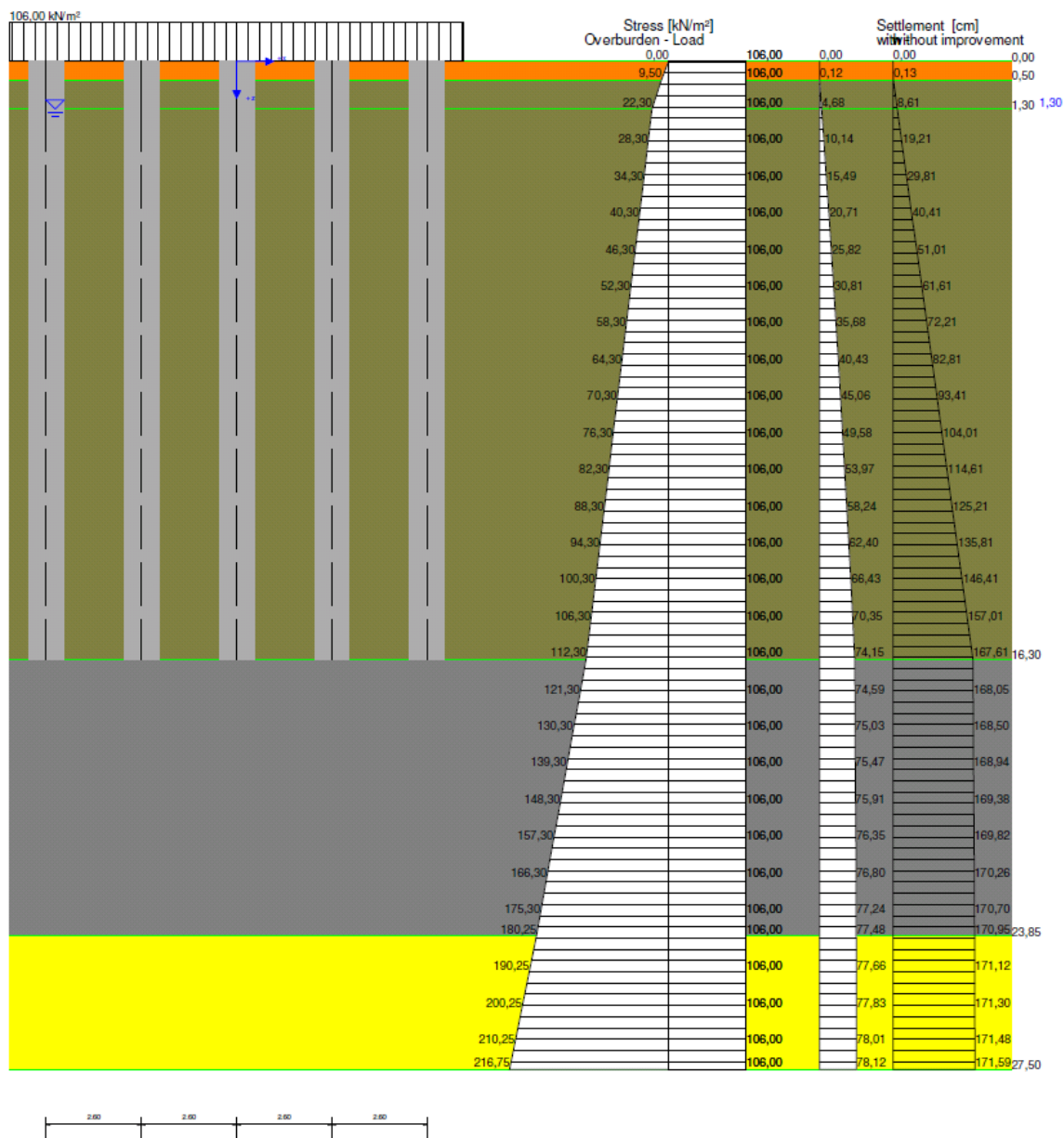


Figura 43: Assentamento por consolidação primária com o método de Priebe (781 mm).

Soil	Upper level	D	DV	E	γ	ϕ	c	μ	Description
	[m]	[m]	[m]	[MN/m²]	[kN/m³]	[°]	[kN/m²]	[-]	
	0,00	0,95	0,95	40,00	19,00	35,00	0,00	0,33	Aterro
	0,50	0,95	0,95	1,00	16,00	2,00	16,00	0,33	Lodos
	1,30	0,95	0,95	1,00	6,00	2,00	16,00	0,33	Lodos
	16,30	0,00	0,00	24,00	9,00	30,00	25,00	0,33	Argila Arenosa
	23,85	0,00	0,00	60,00	10,00	37,00	0,00	0,33	Areia Méd
	27,50	0,00	0,00	60,00	10,00	37,00	0,00	0,33	Areia Méd

D = Column Diameter DV = Column diameter incl. peripheral area

Figura 44: Parâmetros geomecânicos utilizados no cálculo de Priebe.

Cálculo por elementos finitos, modelo de Mohr-Coulomb

O modelo foi preparado com as mesmas características geomecânicas que o modelo utilizado no cálculo de Priebe.

Com o objectivo de tornar o cálculo mais simples e rápido, foi modelado um elemento axissimétrico de acordo com o conceito de célula unitária (solo + coluna), tendo em conta a malha das colunas, o seu diâmetro e profundidade de execução.

ID	Name	Type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]
1	COLUNAS DE BRITA	Drained	21,0	22,0	0,8600	0,8600	0,33	53994,0	0,0
2	LODO ARGILOSO	UnDrained	16,0	17,0	3,0000E-4	3,0000E-4	0,33	674,9	16,0
3	ARGILA ARENOSA	Drained	19,0	21,0	3,0000E-4	3,0000E-4	0,33	16190,0	25,0
4	AREIA MEDIA	Drained	20,0	22,0	86,4000	86,4000	0,33	40496,0	0,0
5	Aterro_Inicial	Drained	19,0	21,0	0,0000	0,0000	0,33	26997,0	0,0
6	Aterro_Precarga	Drained	19,0	21,0	8,6400	8,6400	0,33	20248,0	0,0
7	Aterro_compactado _{final}	Drained	22,0	22,0	8,6400	8,6400	0,33	30372,0	0,0

Figura 45: Parâmetros utilizados no modelo Mohr Coulomb.

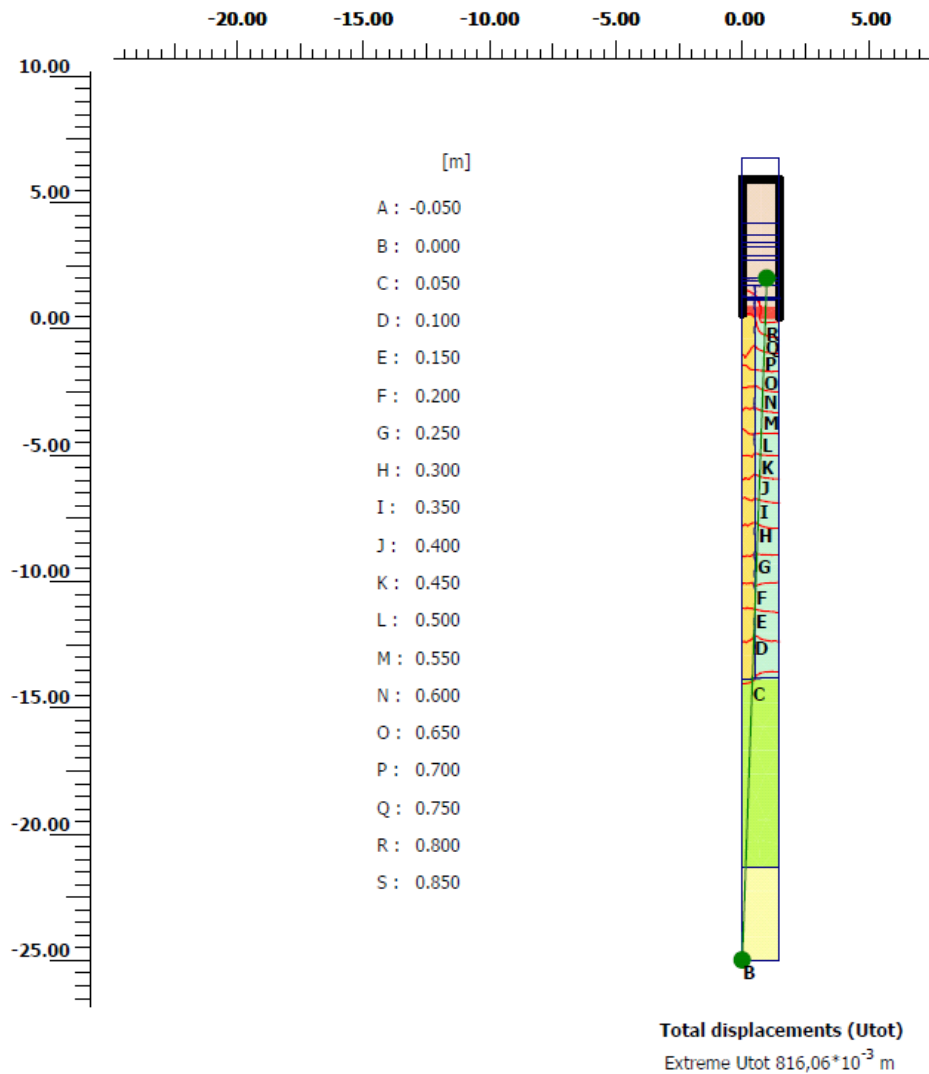


Figura 46: Resultado dos cálculo dos assentamentos com o modelo Mohr-Coulomb.

Este modelo dá-nos apenas o assentamento previsto para a consolidação primária e prevê um assentamento da ordem dos 800 mm, idêntico ao valor calculado pelo método de Priebe.

Cálculo por elementos finitos, modelo Soft Soil Creep Model (baseado no modelo Cam Clay).

Os resultados de alguns ensaios edométricos foram tratados de forma a obter os parâmetros de rigidez para a utilização do modelo de elementos finitos (Sof Soil Creep Model) do

software Plaxis, nomeadamente o K^* ; λ^* e μ^* (índice de recompressibilidade modificado, índice de compressibilidade modificado e índice de fluência modificado, respectivamente) Os parâmetros foram determinados conforme definido no Manual do Plaxis e por Waterman, *et al.* ,(Figura 47 e Figura 48).

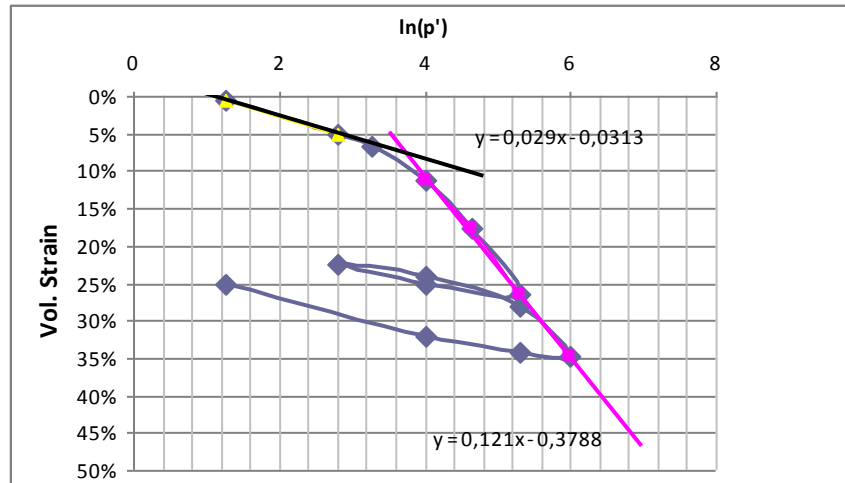


Figura 47: Determinação dos valores de K^* ; λ^*

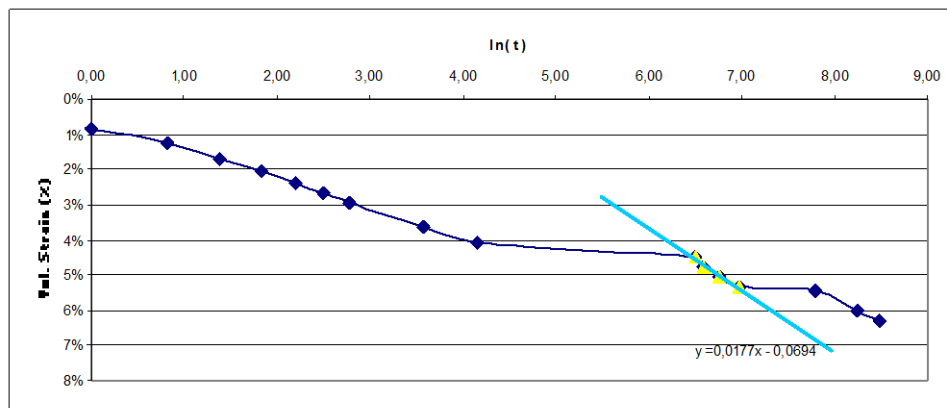


Figura 48: Determinação do valor de μ^* para o patamar de carga de 105 kPa.

Os parâmetros assim determinados utilizados no cálculo por este modelo foram $K^* = 0,029$; $\lambda^* = 0,121$ e $\mu^* = 0,0177$ (para um carregamento de 105 kPa).

Para a determinação do parâmetro μ^* , foram utilizados apenas os pontos iniciais da consolidação secundária (ver linha de tendência de cor azul na Figura 48), uma vez que são

estes pontos os mais representativos da resposta *in situ*. Este fenómeno de descida por patamares foi já observado *in situ* em solos idênticos.

ID	Name	Type	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_h [m/day]	k_v [m/day]	λ^* [-]	κ^* [-]	μ^* [-]	v_{ur} [-]	k_0^{rc} [-]	m	c_{ef} [kN/m ²]	ϕ [°]
2	LODO ARGILOSO	Undrained	16,0	17,0	3,000E-4	3,000E-4	0,1210	0,0290	0,0177	0,15	0,998	0,07	16,0	2,0

Figura 49: parâmetros utilizados no modelo Soft Soil Creep.

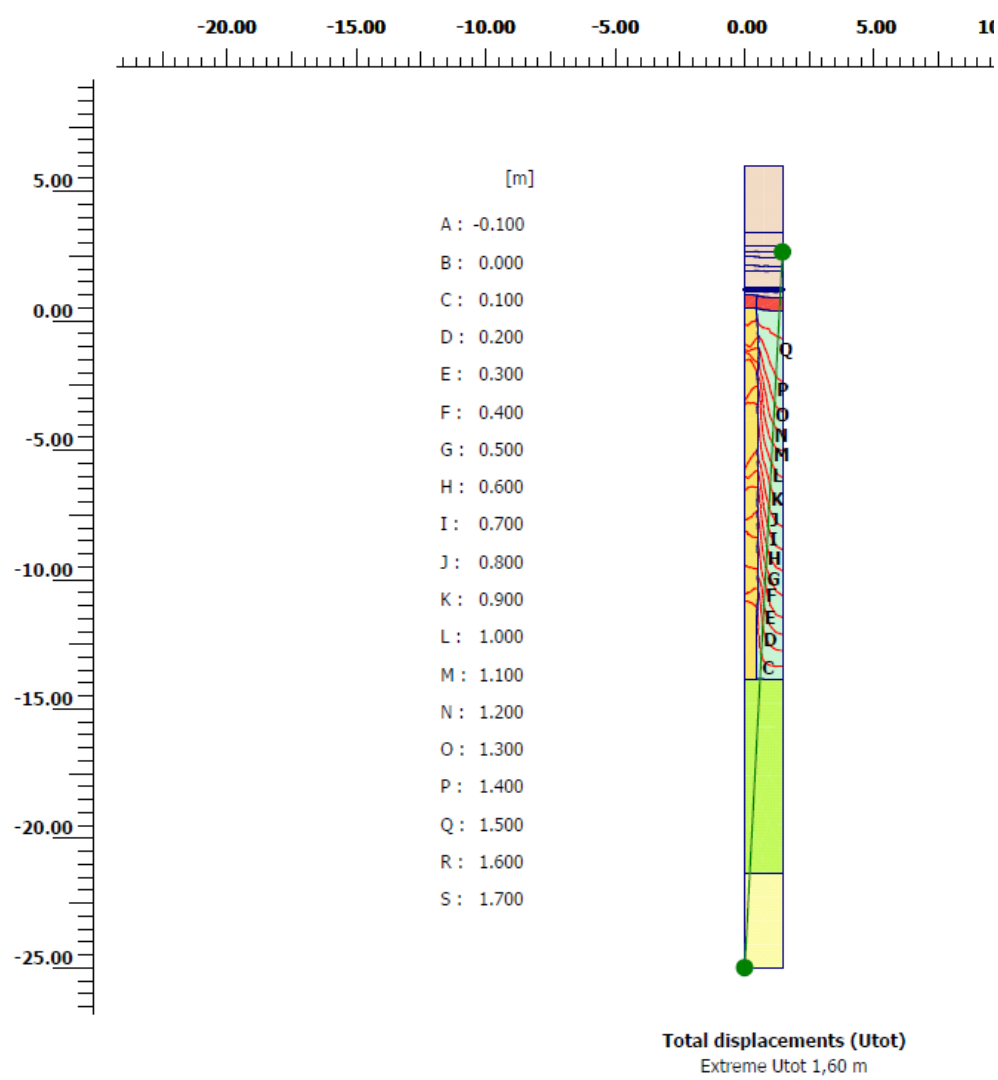


Figura 50: Assentamentos estimados com o modelo Soft Soil Creep Model (1600 mm).

A definição deste modelo foi idêntica ao modelo de Mohr Coulomb, diferindo apenas nos parâmetros da camada de lodos argilosos (2) à qual se atribuíram os parâmetros acima referidos e o modelo de Sof Soil Creep, a todas as restantes camadas foram atribuídos parâmetros geomecânicos e geométricos idênticos ao cálculo anterior e foram calculadas com o modelo Mohr-Coulomb.

O assentamento total calculado após 20 anos é de, 1600 mm, (80% deste valor seria atingido ao final de 5 anos e 90% ao final de 10 anos). Claro que neste caso isso não se verificará efectivamente uma vez que a pré-carga do aterro será removida antes de atingir essa fase. Para este tipo de tratamentos será importante aplicar uma pré carga de aterro superior às cargas de exploração posteriores para garantir assentamentos controlados.

Pela análise da Figura 51 pode-se verificar que os assentamentos calculados pelo modelo Mohr-Coulomb se ajustam bastante bem aos assentamentos observados até aos 200 dias de observações, a partir dessa altura o modelo deixará de representar os fenómenos que estão na base dos assentamentos observados.

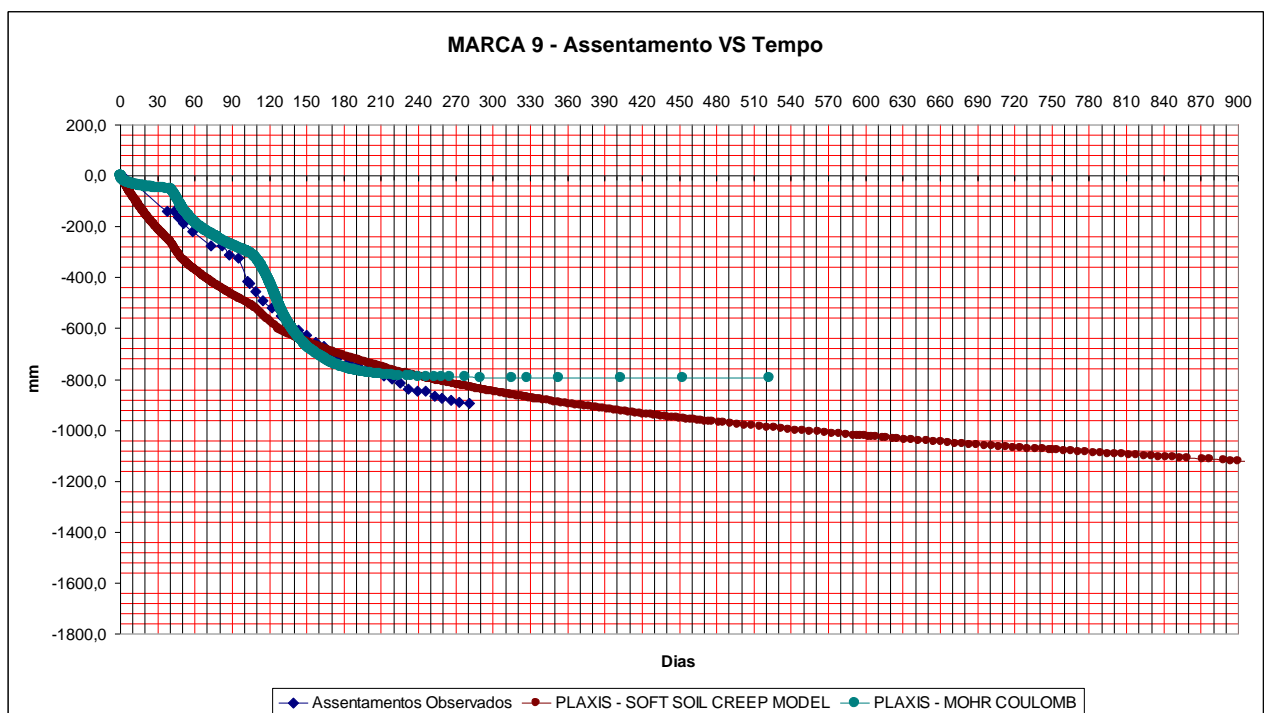


Figura 51: Assentamento observados e calculados com modelos Mohr Coulomb e Soft Soil Creep.

O modelo em que foi utilizado o Soft Soil Creep, parece não se ajustar tão bem no início da curva dos assentamentos observados e no entanto na parte final da curva aparentemente

parece ajustar-se bastante bem. As observações dos assentamentos terminaram a partir dos 280 dias, após esse tempo a aterro de pré carga será removido para continuar a obra. A confirmar-se a representatividade do modelo Soft Soil Creep, este poderia agora ser utilizado para prever o comportamento do solo face a diferentes hipóteses de carregamento impostas pelas soluções construtivas necessárias ao desenvolvimento dos trabalhos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7 Conclusões

O presente estudo desenvolvido no âmbito do mestrado em Engenharia Geológica na Universidade de Aveiro, tem como objectivo o estudo e a aplicação da técnica de melhoramento de solos por colunas de brita, focando alguns aspectos práticos do dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito à aplicação do método observacional, apresentando um caso concreto de estudo em que foram tratados solos moles com colunas de brita e em que foram monitorizados os assentamentos, permitindo a análise do comportamento global.

Foi apresentado e testado, aparentemente com sucesso o método observacional desenvolvido por Asaoka, que poderá representar uma importante ferramenta de apoio à decisão e ao projecto no caso de trabalhos em solos de difícil caracterização, especialmente se utilizada em conjunto com o modelo *Soft Soil Creep* (Plaxis) para determinar assentamentos de consolidação secundária. Para que esta possível ferramenta funcione será necessário definir adequadamente as campanhas de observação, com monitorização de assentamentos e se possível pressões de água no solo.

Estes resultados e a aplicação da técnica de Asaoka com os desenvolvimentos resultantes dos trabalhos de Magnan e Deroy, permite estimar os assentamentos finais com base nos dados de observação das marcas de assentamento.

Da análise dos dados parece salientar-se que os lodos da bacia do Tejo estudados são sensíveis e podem ser afectados por consolidação secundária em 30 a 40% do assentamento total, o que torna necessária a aplicação do método observacional, e de modelos de cálculo que contemplem a fluência, como o modelo desenvolvido pela empresa Plaxis (*Soft Soil Creep Model*).

Em projectos futuros seria importante comparar os resultados obtidos através do método de Asaoka e do Soft Soil Creep Model, com os parâmetros e métodos de aplicação usual neste tipo de análise.

Em estudos futuros a análise cruzada de resultados de ensaios edométricos com a medição contínua da variação das pressões de água no solo e sua comparação com os resultados lidos *in situ*, poderá ajudar a perceber melhor os processos, uma vez que aparentemente a componente predominante de consolidação primária no caso estudado se processa muito rapidamente.

Seria também interessante estudar, com mais detalhe, a variação do teor em matéria orgânica e a influência que eventualmente possa ter pequenas quantidades deste componente no comportamento do solo face ao carregamento.

Adicionalmente, poder-se-ia comparar o comportamento destes lodos argilosos de origem fluvio marinha do Vale do Tejo, com outras zonas onde se poderão encontrar, nomeadamente nas zonas de fluviais junto à costa, essencialmente em Aveiro, Figueira da Foz, Lisboa e Algarve e mesmo comparar estes solos com solos do mesmo tipo depositados em outras partes do mundo, onde poderão existir grandes acumulações e onde já existem alguns estudos desenvolvidos sobre o assunto com é o caso da Noruega e do Brasil, por exemplo.

8 Referências bibliográficas

Asaoka, Akira, 1978: Observational Procedure of Settlement Prediction. Soils and Foundations, Vol. 18, No.4, 87-91. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dec. 1978.

Asaoka, et al., 1984: An Inverse Problem Approach to The Prediction of Multi-Dimensional Consolidation Behavior. Soils and Foundations, Vol. 24, No. 1, 49-62. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mar. 1984.

Carta Geológica de Portugal, 1/50000, Folha 30D, 1962.

Maranha-Neves E., Caldeira L., 2009: Documentos de apoio ao Curso de Observação em Geotecnia, 2009: IST/FUNDEC/LNEC, CD. Maio, 2009.

Esrig M. I., Bachus R. C., 1991: Deep Foundation Improvements: Design, Construction and Testing, Esrig/Bachus editors, STP 1089, 337 p.

EN 1097-3: Determinação da baridade e do volume de vazios

EN 14731:2005: Execution of special geotechnical works – Ground treatment by deep vibration. Brussels, Comité Européen de Normalisation.

ENV 1991-1:1994: Eurocode 1 - Basis of Design and Actions on Structures - Part 1: Basis of Design. Brussels, Comité Européen de Normalisation.

EN 1997-1:2004: Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. Brussels, Comité Européen de Normalisation.

EN 1997-2:2007: Eurocode 7 - Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing. Brussels, Comité Européen de Normalisation.

Fernandes, M, 2006: Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais. Vol I. Edições FEUP. 451 p.

Federal Highway Administration, 1998. Ground Improvement Technical Summaries, Vol. 1, FHWA-SA-98-086, Washington, D.C.

Greenwood, D.A. (1970): Mechanical improvement of soils below ground surface. Conference on Ground Engineering. Institution of Civil Engineers. London. Paper II pp.11-22.

K. Kirsch e W. Sondermann, 2003. Ground improvement. In U. Smolczyk (ed.), Geotechnical Engineering Handbook. Vol. 2: 1-56. Berlin: Ernst & Sohn.

KELLER, 2002: Catálogo Keller de Processos de Vibração Profunda dos Solos – Catálogo 10-02 PT

Magnan e Deroy, 1980: Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages. Bulletin de Liaison des LPC, n°109. Laboratoire Central de Ponts et Chaussées. Septembre-Octobre 1980.

Mitchell, J. K., 1981: Soil Improvement: State-of-the-Art Report, Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, pp. 509-565.

NF P18-572:Micro-Deval abrasion test (Dec. 1990)

NF P18-573:Los Angeles test (Dec. 1990)

NF P11-212-2 (DTU 13.2) (Novembre 1994): Travaux de fondations profondes pour le bâtiment - Partie 2 : Cahier des clauses spéciales.

P11-212-1 (DTU 13.2) (Septembre 1992): Travaux de fondations profondes pour le bâtiment - Partie 1 : Cahier des clauses techniques.

Plaxis Version 8 – Material Models Manual. CD.

Priebe, H.J., 1978:Abschätzung des Setzungsverhaltes eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes, Die Bautechnik, Vol. 55, n.º 9, pp.282-284.

Priebe, H. J., 1995: The design of vibro-replacement. Ground Engineering. Keller Grundbau GmGH, December 1995. Technical paper 12-61E, 16 p.

Ralph Peck, 1969: Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Ninth Rankine Lecture, Geotechnique, June 1969, pp.171-187.

Raju et al., 2004: Ground Improvement using Vibro Replacement in ASIA 1994 to 2004, a 10 Year Review. 5th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur.

Soyez, B. (1985):Méthodes de dimensionnement des colonnes ballastées. Boletín do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Jan/Fev 1985. Ref. 2954

Waterman, *et al.*: Practical Application of the Soft Soil Creep Model – Part I, Part II, Part III.

<http://www.plaxis.nl/publication/15///Waterman+Broere+Practical+application+of+the+Soft+Soil+Creep+model/>

XP94-047, 1998: Teneur pondérale en matière organique – méthode par calcination.